

# TIIVISTÄMISTYÖT



TIE- JA VESIRAKENNUSHALLITUS  
MAATUTKIMUSTOIMISTO  
JÄRJESTELYTOIMISTO 1971

TVH 2.839 A4

71-1238/Kr335





# TIIVISTÄMISTYÖT

## SISÄLLYSLUETTELO

- I MIKSI TIIVISTETÄÄN  
E. Lehtipuu
- II TIIVISTÄMISEN TEORIA  
E. Lehtipuu
- III MILLÄ TIIVISTETÄÄN - TIIVISTYSKONEET  
T. Siiskonen
- IV MITEN TIIVISTETÄÄN  
M. Annila
- V TIIVISTÄMISTYÖN KUSTANNUKSET JA TYÖSUUNNITTELU  
A. Saarela
- VI TIIVISTÄMISTYÖN JÄRJESTELY JA VALVONTA  
I. Rahiala
- VII TIIVISTÄMISEN LAADUNTARKKAILU  
S. Lohijoki  
I. Viherlehto
- VIII LAADUNVALVONNAN TULOKSIA  
R. Orama



KURSSIA VALMISTELLUT TOIMIKUNTA

M. ANNILA

U. CASTREN

I. KANKAINEN

E. LAHTI

R. ORAMA (puheenjoht.)

I. RAHIALA

## I MIKSI TIIVISTETÄÄN

### 1. TIIVISTÄMISEN TARVE TIEN TASAISUUSVAATIMUSTEN VALOSSA

- 1.1 Yleistä epätasaisuuden haitoista
- 1.2 Epätasaisuuden vaikutus ajomukavuuteen
  - 1.2.1 Värähtelyn aistiminen kiihtyvyytenä ja haitan asteikko
  - 1.2.2 Haitan riippuvuus epätasaisuuden korkeudesta
- 1.3 Epätasaisuuden vaikutus tienpidon kustannuksiin

### 2. TIIVISTÄMISTARVE TIEN KANTAVUUSVAATIMUSTEN VALOSSA

- 2.1 Mitoitusmenetelmien pohjautuminen kimmomoduleihin
- 2.2 Kimmomodulien ja rakennepaksuuden riippuvuus tiiviyydestä

### 3. MIKSI TIIVISTETÄÄN

## II TIIVISTÄMISEN TEORIAA

### 1. MAA-AINEKSEN OLOTILAN YHTÄLÖ

### 2. VEDEN VAIKUTUS TIIVISTETTÄVYYTEEN

### 3. MAA-AINEKSEN MUU KÄYTTÄYTYMINEN TIIVISTETTÄESSÄ

### 4. PAINEEN LEVIÄMINEN KONEESTA MAAHAN

- 4.1 Miksi tiivistettävän kerroksen yläpinta voi löyhtyä

### 5. TIIVISTETTÄVYYDEN RIIPPUVUUS ALUSTAN KANTAVUUDESTA

### III M I L L Ä T I I V I S T E T Ä Ä N - T I I V I S T Y S K O N E E T

#### 1. STAATTISESTI VAIKUTTAVAT TIIVISTYSKONEET

##### 1.1 Sileävalssijyrät

###### 1.1.1 Kolmivalssijyrät

###### 1.1.2 Tandemijyrät

###### 1.1.3 Triplex-jyrät

##### 1.2 Kumipyöräjyrät

###### 1.2.1 Vedettävät kumipyöräjyrät

###### 1.2.2 Itsekulkevat kumipyöräjyrät

##### 1.3 Erikoisjyrät

###### 1.3.1 Sorkkajyrät

#### 2. DYNAAMISESTI VAIKUTTAVAT TIIVISTYSLAITTEET

##### 2.1 Vedettävät täryjyrät

##### 2.2 Tärysorkkajyrät

##### 2.3 Itsekulkevat täryjyrät

###### 2.3.1 Kaksoistäryvalssijyrät

###### 2.3.2 Tandem-jyrät

###### 2.3.3 Vetopäällä varustetut täryjyrät

##### 2.4 Tärykelkat

##### 2.5 Erikoistäryttimet

##### 2.6 Tulevaisuuden näkymiä

### IV M I T E N T I I V I S T E T Ä Ä N

#### 1. TIEN ERI RAKENNEOSIEN TIIVISTYKSESSÄ ESIINTULEVIA KYSYMYKSIÄ

##### 1.1 Perusmaan tasaaminen ja tiivistäminen

##### 1.2 Tiivistäminen sementti- ja kalkkistabiloin- nin yhteydessä

##### 1.3 Rumputyöt ja siltojen taustojen täytöt



- 1.4 Maapenkereet
- 1.5 Louhospenkereet
- 1.6 Tien sitomattomat kerrokset

## 2. TIIVISTYSKALUSTON VALINTAAN JA KÄYTTÖÖN LIITTY- VISTA TEKIJÖISTÄ

- 2.1 Maalaji
- 2.2 Rakeisuus ja kivisyys
- 2.3 Vesipitoisuus
- 2.4 Sääolosuhteet
- 2.5 Työn suuruus ja laatu
- 2.6 Kerralla tiivistettävän kerroksen paksuus
- 2.7 Ajonopeus
- 2.8 Rengaspaine
- 2.9 Tiivistystyön määrä

## V TIIVISTÄMISTYÖN KUSTAN- NUKSET JA TYÖSUUNNITTELU

### 1. KERROSTEN RAKENTAMISEEN LIITTYVIÄ KUSTANNUS- TIETOJA

### 2. TIIVISTYSKUSTANNUKSIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

- 2.1 Tiivistystyömäärään vaikuttavat tekijät
  - 2.1.1 Täryjyrät
  - 2.1.2 Materiaalin vaikutus täryjyrän tiiv-  
vistystyömäärään
  - 2.1.3 Kumipyöräjyrät
  - 2.1.4 Materiaalin vaikutus kumipyöräjyrän  
tiivistystyömäärään
  - 2.1.5 Tiiviys ja kantavuus

- 2.2 Kustannusten alentamismahdollisuuksia
  - 2.2.1 Eristyskerroksen rakentaminen
  - 2.2.2 Jakavan kerroksen rakentaminen
  - 2.2.3 Penkereen rakentaminen

### 3. TIIVISTYSKAPASITEETIT JA NOMOGRAMMIT

- 3.1 Laadintaperusteet
- 3.2 Kastelu
- 3.3 Tiivistyskustannukset

## VI TIIVISTÄMISTYÖN JÄRJESTELY JA VALVONTA

### 1. TIIVISTÄMISTYÖN SUUNNITTELU

- 1.1 Suunnittelun tarkoitus
- 1.2 Suunnitteluun vaikuttavat tekijät
  - 1.2.1 Perusmaan vaihtelut
  - 1.2.2 Kerrosmateriaalin ja kerroksen paksuuden vaihtelut
  - 1.2.3 Säätila ja kosteusolosuhteet
  - 1.2.4 Rakentamisaikataulu
- 1.3 Suunnitelman sisältö
  - 1.3.1 Kaluston valinta
  - 1.3.2 Kaluston käyttöohjeet
  - 1.3.3 Muut työmenetelmäohjeet
  - 1.3.4 Työn ajoitus, työkohteet ja työjärjestys
  - 1.3.5 Kustannukset
- 1.4 Suunnitelman esitystapa

## 2. TIIVISTÄMISTYÖN VALVONTA

- 2.1 Valvonnan käsite
- 2.2 Valvomisen suoritustapa
  - 2.2.1 Suunnitelman tarkistaminen
  - 2.2.2 Kaluston oikean käytön valvonta
  - 2.2.3 Aikataulun ja kustannusten seuraaminen
  - 2.2.4 Laaduntarkkailu
- 2.3 Toimenpiteet huonon laaduntarkkailutuloksen johdosta
  - 2.3.1 Vesipitoisuus alle optimiarvon
  - 2.3.2 Tiiviys huono
  - 2.3.3 Kantavuus heikko

## 3. LOPPUYHTEENVETO

# VII TIIVISTÄMISTYÖN LAADUN TARKKAILU

## 1. TIIVISTÄMISTYÖN LAADUNVALVONNAN SUUNNITTELU

- 1.1 Suunnittelun lähtökohhta ja tavoitteet
- 1.2 Mittaus- ja tutkimusmenetelmien suunnittelu
  - 1.2.1 Rakeisuustutkimukset
  - 1.2.2 Tiiviys- ja kantavuusmittaukset
    - 1.2.2.1 Alusrakenne
    - 1.2.2.2 Suodatin- ja eristyskerros
    - 1.2.2.3 Jakava ja kantava kerros
    - 1.2.2.4 Stabiloitava alusrakenne- tai päällysrakennekerros
- 1.3 Mittausvälineiden käytön suunnittelu
- 1.4 Henkilöstön suunnittelu
- 1.5 Suunnitelman laatijat



## 2. TUTKIMUKSET JA MITTAUKSET

### 2.1 Laboratoriotutkimukset

- 2.1.1 Rakeisuustutkimukset
- 2.1.2 Vesipitoisuusmääritykset
- 2.1.3 Proctor-koe

### 2.2 Kenttätutkimukset

- 2.2.1 Tilavuuspainomääritykset
  - 2.2.1.1 Vesivolymetri
  - 2.2.1.2 Hiekkavolymetri
  - 2.2.1.3 Öljymenetelmä
  - 2.2.1.4 Kipsimenetelmä
  - 2.2.1.5 Radiometrimenetelmä
- 2.2.1 Kantavuustutkimukset
  - 2.2.2.1 Levykuormituskoe
  - 2.2.2.2 Benkelmanpalkkikoe

## 3. RAPORTOINTI

### 3.1 Raportointitasot

- 3.1.1 Työmaataso
- 3.1.2 Toiminnanhaarataso
- 3.1.3 Osastotaso

## VIII LAADUNVALVONNAN TULOKSIA

### 1. TIIVISTYSTYÖN TULOSVALVONTA

### 2. KANTAVUUSTULOKSET

- 2.1 Tiiviysaste
- 2.2 Kantavuusarvot

### 3. PROCTOR-TULOKSET

### 4. TIIVISTYSTYÖN LAADUN ARVOSTELU

Tekn. tri Eero Lehtipuu

I M I K S I T I I V I S T E T Ä Ä N

## I MIKSI TIIVISTETÄÄN?

### JOHDANTO

- Tiivistämisen historia
- 1800-luvun puolivälistä alkaen sileävalssi-höyryjyriä Euroopan maiden kadunrakennustyömailla. Eri maiden rautatieverkko on rakennettu yleensä ilman mitään koneellista tiivistämistä.
- 1905 ensimmäiset sorkkajyrät USA:ssa; käytettiin hevosvetoisina maapatotöiden hienojen maa-ainesten tiivistämiseen.
- 1933 R. Proctorin (USA) laboratoriokokeet tiivistettävyydestä; hän loi optimivesipitoisuuden käsitteen ja standardisoi "Proctor-kokeen" suori-tuksen.
- 1930-luvulla ensimmäiset kumipyöräjyrät USA:ssa.
- 1930-luvulla ensimmäiset tärykelkat ja tärylevyt Saksan moottoritietyömailla.
- 1940-luvulla ensimmäiset hinattavat ja itsekulkevat täryjyrät, lähinnä Saksassa.
- 1940-luvulta alkaen raskaat (kumipyörä-)koejyrät USA:ssa, paino tavallisesti 50-75 tonnia, lentokentillä jopa 200 ton.

- 1950- ja 1960-luvulla kaluston monipuolistuminen ja eriytyminen: tehokkain menetelmä kullekin maa- lajille, jyrien sopivan painon valinta jne. Tiivistämisen valvontaan aikaisempaa suurempi huomio.

Suomen olosuhteissa on tiivistämisen määrää aikaisemmin säännöstellyt toisaalta kaluston saanti, toisaalta se, että soratie kautena ei tierakenteen tiivistäminen ollut sillä tavoin välttämätöntä kuin myöhemmin kestopäällysteiden kaudella.

Tiivistyskalustoa oli Suomessa kyselyjen mukaan eri vuosina seuraavasti:

	1955	1963	1968
Valssijyriä	53	247	264
Täryjyriä	-	245	361
Sorkkajyriä	-	50	24
Kumipyöräjäyriä	-	18	66
Tärylevyjä	-	?	480

Tiivistämisen valvonta Suomessa yleensä muihin maihin verrattuna hyvällä tasolla. Kaluston monipuolisuuden ansiosta aktiivisesta tiivistämisestä on tullut optimointikysymys. On pyrittävä parhaaseen tiiviyteen sopivimpana ajankohtana sopivimmalla menetelmällä pienimin kustannuksin.

- Eri tavoin tiivistyvät tien osat: pohjamaa ja penker / päällysrakenne

Tien jälki-muodonmuutokset aiheutuvat joko pohjamaan tai penkereen ja päällysrakenteen tiivistymisenä. Pohjamaan tiivistäminen on vaikeata, ellei kysymyksessä

ole nimenomainen pohjanvahvistus. Toisaalta vain pehmeikkö tiivistyy rakentamisvaiheen jälkeen. Periaatteessa kaikki ylempien kerrosten jälkitiivistyminen on estettävissä. Tilastollisesti vain poikkeustapauksissa on tien pinnan myöhempiin muodonmuutoksiin pätevyys, painuma-altis vahvistamaton pohjamaa.

# 1. TIIIVISTÄMISEN TARVE TIEN TASAISUUSVAATIMUSTEN VALOSSA

## 1.1 YLEISTÄ EPÄTASAISUUDEN HAITOISTA

Tiivistämisen päätarkoitus on pitää tie mahdollisimman kauan mahdollisimman tasaisena. Epätasaisuudesta aiheutuu seuraavia haittoja:

- Ajomukavuuden vähentyminen
- Tien ja osittain ajokaluston lisäkuormittuminen ja korjaustarpeen kasvu
- (Ajoturvallisuuden heikkeneminen, jos epätasaisuus on jatkuva)
- Tien ulkonäön huonontuminen
- Joskus: pintakuivatuksen vaikeutuminen

Haitoista kaksi ensinmainittua ovat tärkeimmät ja niistä ajomukavuus sopii parhaiten haitan suuruuden kriteeriksi yleispätevän luonteensa vuoksi.



## 1.2 EPÄTASAISUUDEN VAIKUTUS AJOMUKAVUUTEEN

### 1.2.1 V ä r ä h t e l y n a i s t i m i n e n k i i h t y v y y t e n ä j a h a i - t a n a s t e i k k o

Epätasaisuus aikaansaa ajoneuvon jousituksen vuoksi siihen pystysuuntaista värähtelyä. Värähtelyn dimensiot ovat taajuus (Hz) ja amplitudi (mm), joka on muunnettavissa kiihtyvyydeksi ( $\text{m/s}^2$  tai g-yksikkö). Kiihtyvyys vaikuttaa välittömästi ihmisen kokemaan ajomukavuuteen. Kuva 1 esittää erästä yhteenvedoa aistimisvoimakkuuden rajojen riippuvuudesta värähtelyn taajuudesta ja kiihtyvyydestä (kiihtyvyys vaikuttaa enemmän kuin taajuus).

10 Hz:n kohdalta otetut kynnysarvot ovat likimain seuraavat:

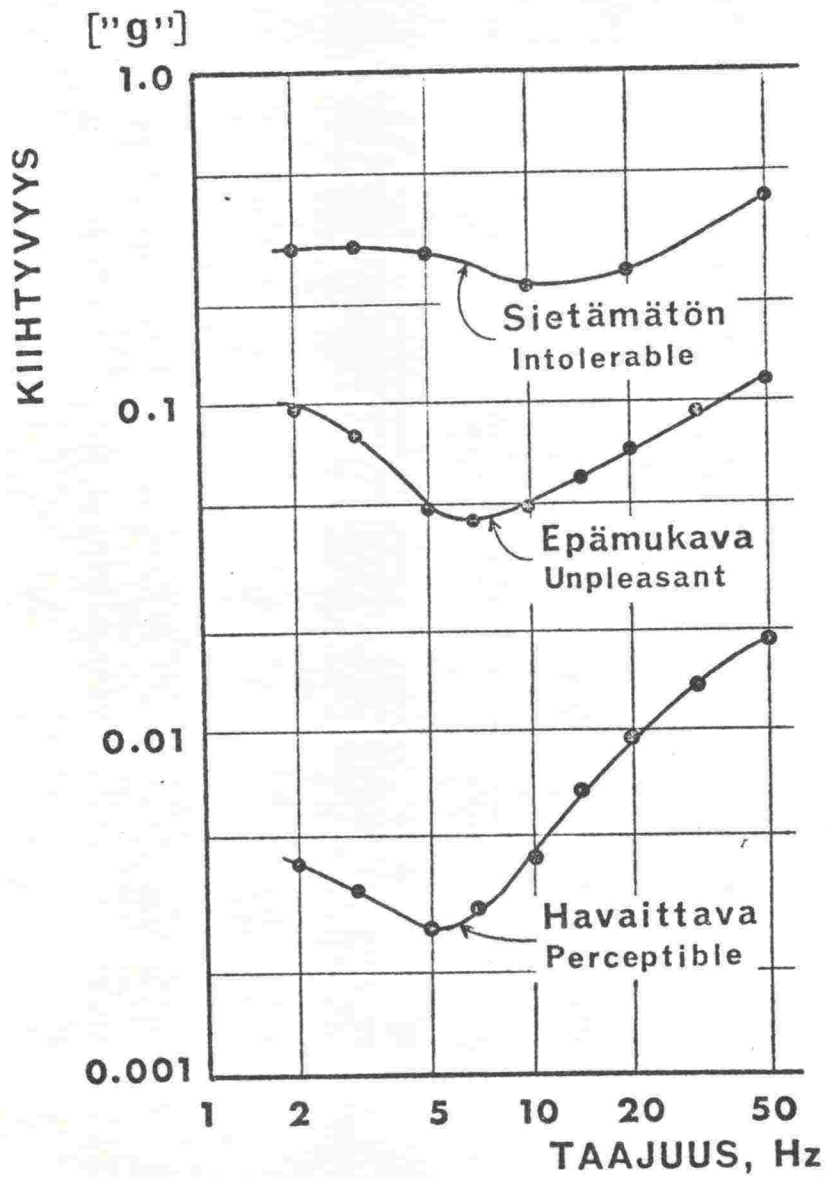
- Tuntoraja	0,004 • g	) Arvostelu melko an-
- Haittaraja	0,05 • g	) karaa, mutta eri
- Sietoraja	0,25 • g	) henkilöryhmillä hy-
		vin yhdenmukaista

Kiihtyvyyden ja tietyn taajuuden vaikutus voidaan yhdistää yhdeksi pisteluvuksi, haitta-asteeksi. Jos taajuus on 10 Hz, haitta-aste lasketaan kaavasta  $H = 200 \cdot a$ , jossa a on värähtelyn kiihtyvyys g-yksikköinä. Askeisia kynnysarvoja vastaavat siten seuraavat haitta-asteet:

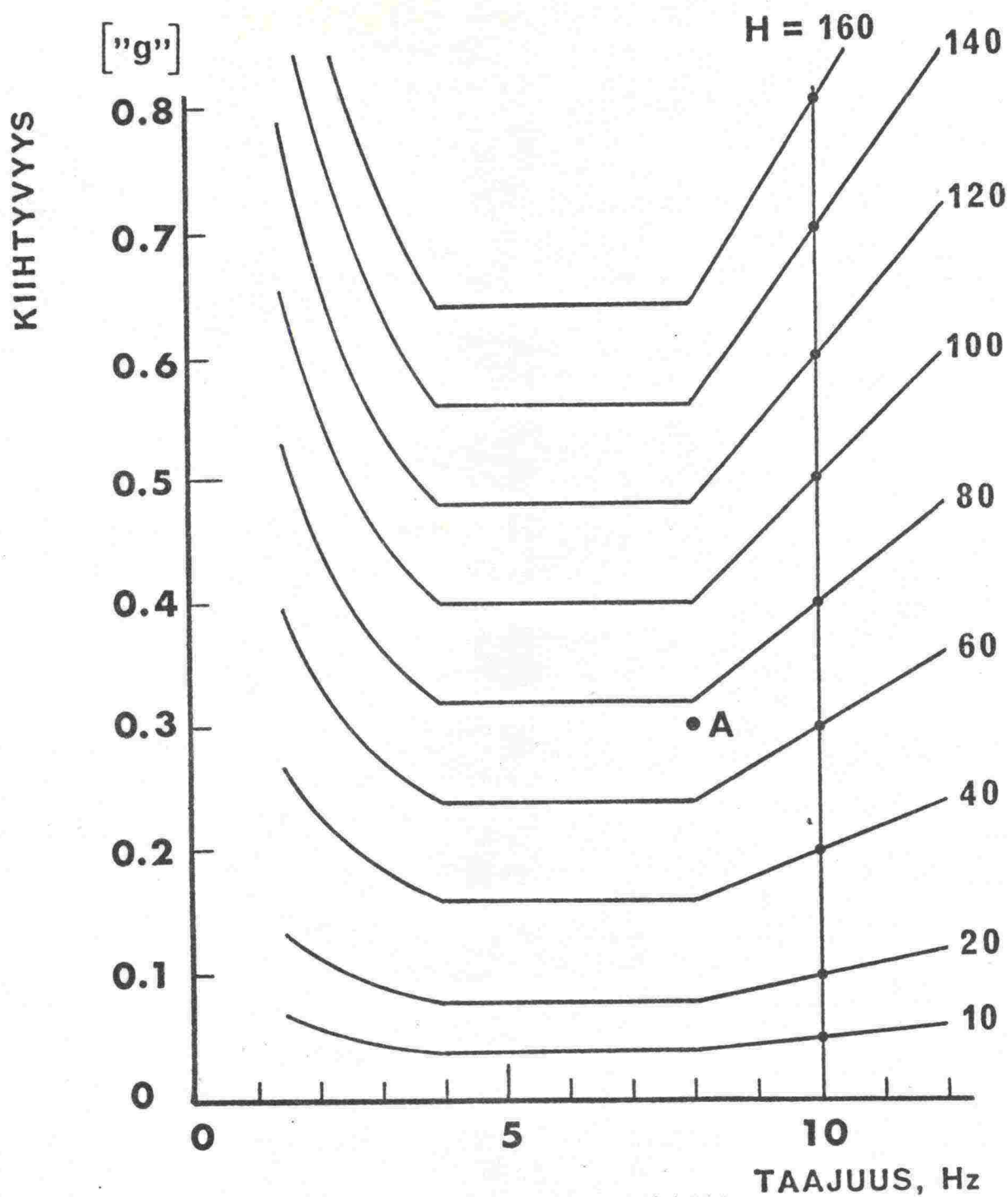
- Tuntoraja:	haitta-aste	0
- Haittaraja:	haitta-aste	= 10
- Sietoraja:	haitta-aste	= 50

Kun värähtelyn taajuus on jokin muu kuin 10 Hz, saadaan tiettyä kiihtyvyyttä vastaava haitta-aste kuvasta 2.

Esim. 0,3 g-yksikön kiihtyvyys vastaa 8 Hz:n taajuudella häirtä-astetta 75, kun sama kiihtyvyys 10 Hz:n taajuudella vastaisi 60 pisteen häirtä-astetta. (Vielä suuremmilla taajuuksilla häirtä jatkuvasti pienenee).



Kuva 1. Aistivoimakkuuden rajojen riippuvuus värähtelyn taajuudesta ja kiihtyvyydestä.

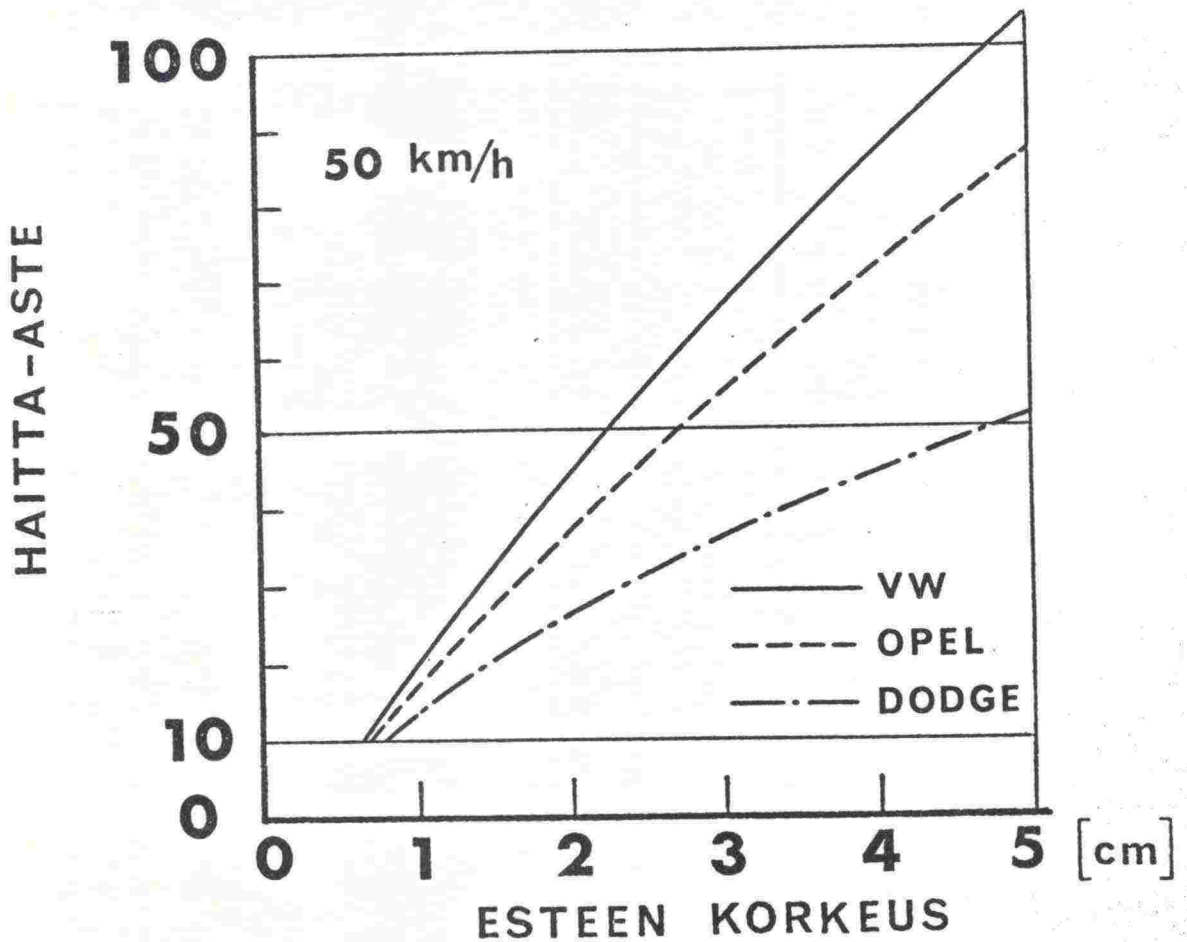


Kuva 2. Tiettyä kiihtyvyyttä vastaava häiritsevä asteen taajuus vaihtelee

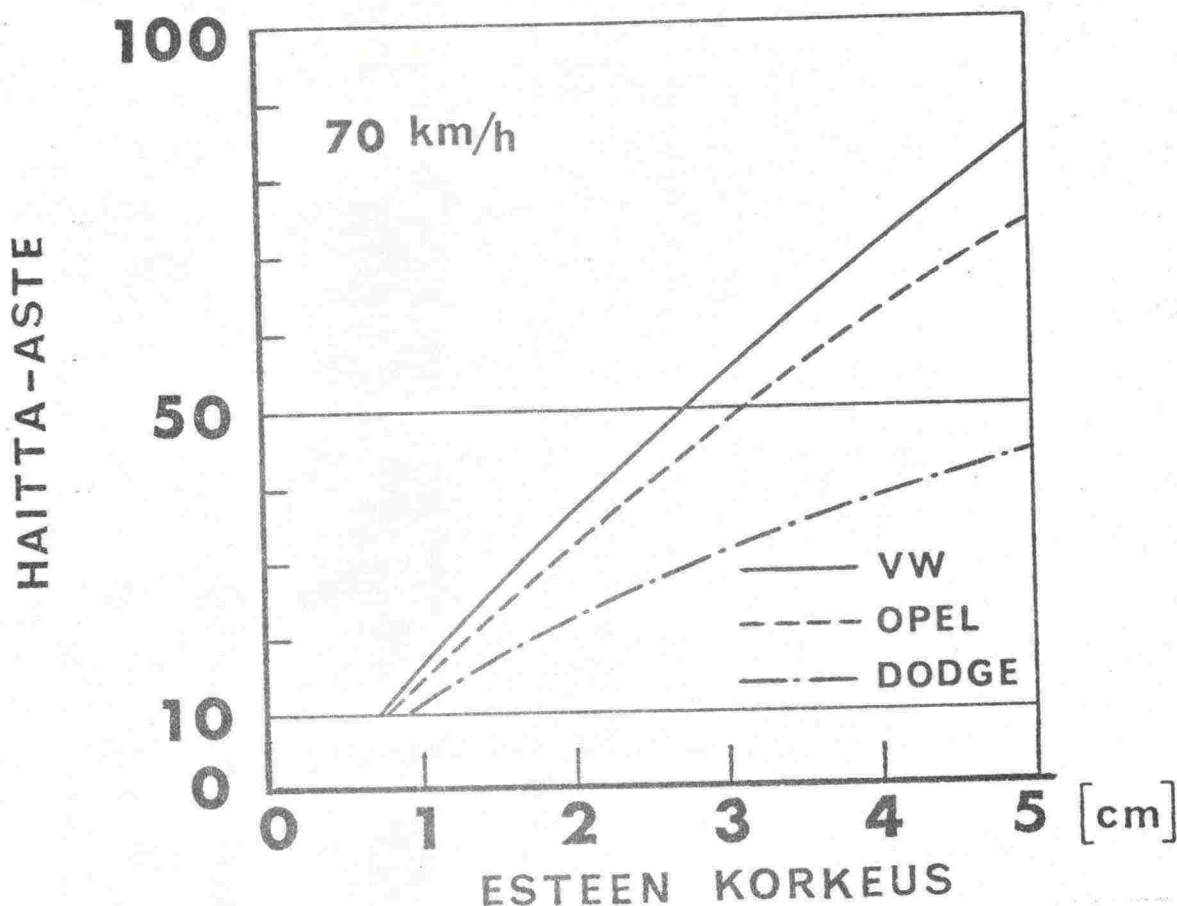


### 1.2.2 Haitan riippuvuus epä-tasaisuuden korkeudesta

Ajomukavuuteen vaikuttaa epätasaisuuden geometrian (korkeus, pituus) lisäksi ajonopeus ja jousituksen laatu. Nämä yhdistettynä saadaan kokeisiin perustuvat kuvat 3 ja 4, joissa haitta-aste on ilmaistu epätasaisuuden korkeuden funktiona. Epätasaisuus on tällöin lyhyt ja jyrkkä. Lisääntyvä ajonopeus pienentää haittaa, koska impulssin lyhytaikaisuuden vuoksi yhä pienempi osa siitä "ehtii" jousisysteemin läpi ihmiseen asti.



Kuva 3. Haitta-aste ilmaistuna epätasaisuuden korkeuden funktiona

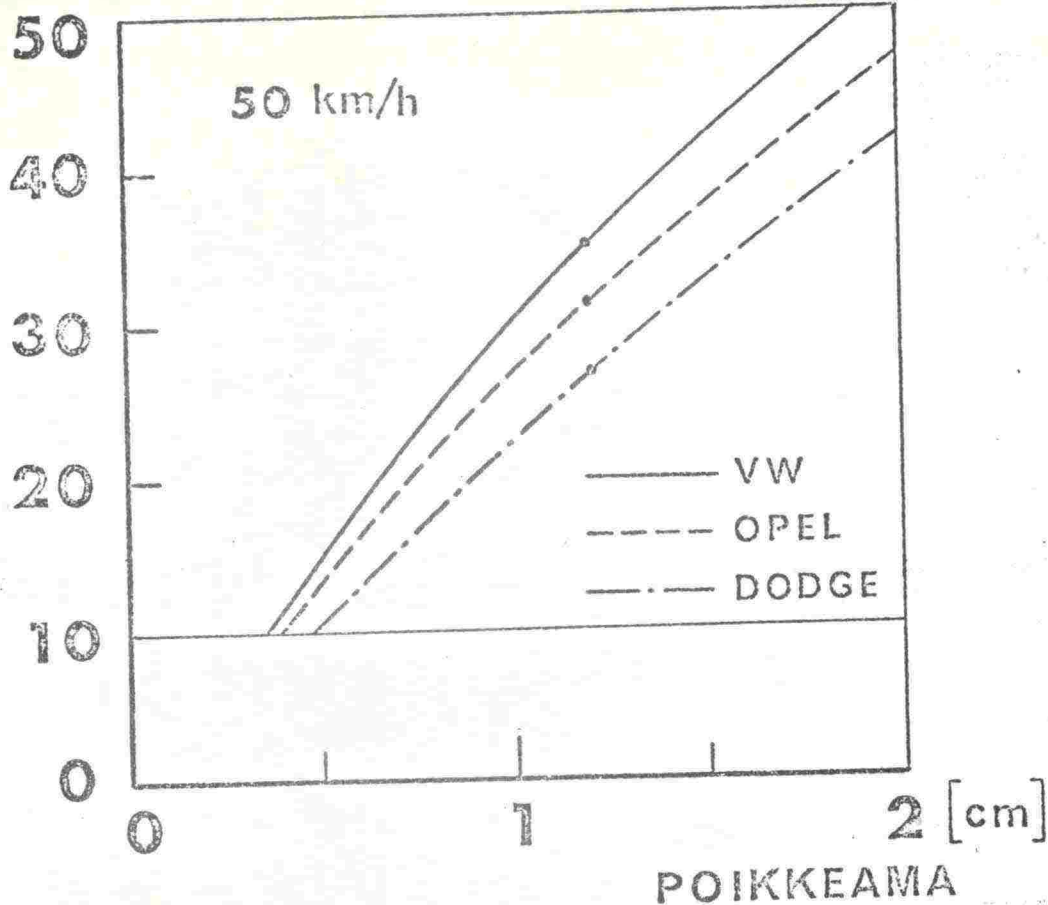


Kuva 4. Haitta-aste ilmaistuna epätasaisuuden korkeuden funktiona

Kuvat 5 ja 6 esittävät loivien epätasaisuuksien tuottamia haitta-asteita. Epätasaisuuden korkeus on ilmaistu poikkeamana 5 m oikolautamittarista. Lisääntyvän ajonopeuden vaikutus on äskeiseen verrattuna päinvastainen: mitä kovempaa ajetaan, sitä epämukavampaa. Syynä on kiihtyvyyksien kasvu, jota ei jousitus kykene "suodattamaan". Jos nopeus on 100 km/h, jo 2-3 mm poikkeama 5 m oikolaudasta alkaa haitata ja 1,6 - 1,9 cm poikkeama on "sietämätön".

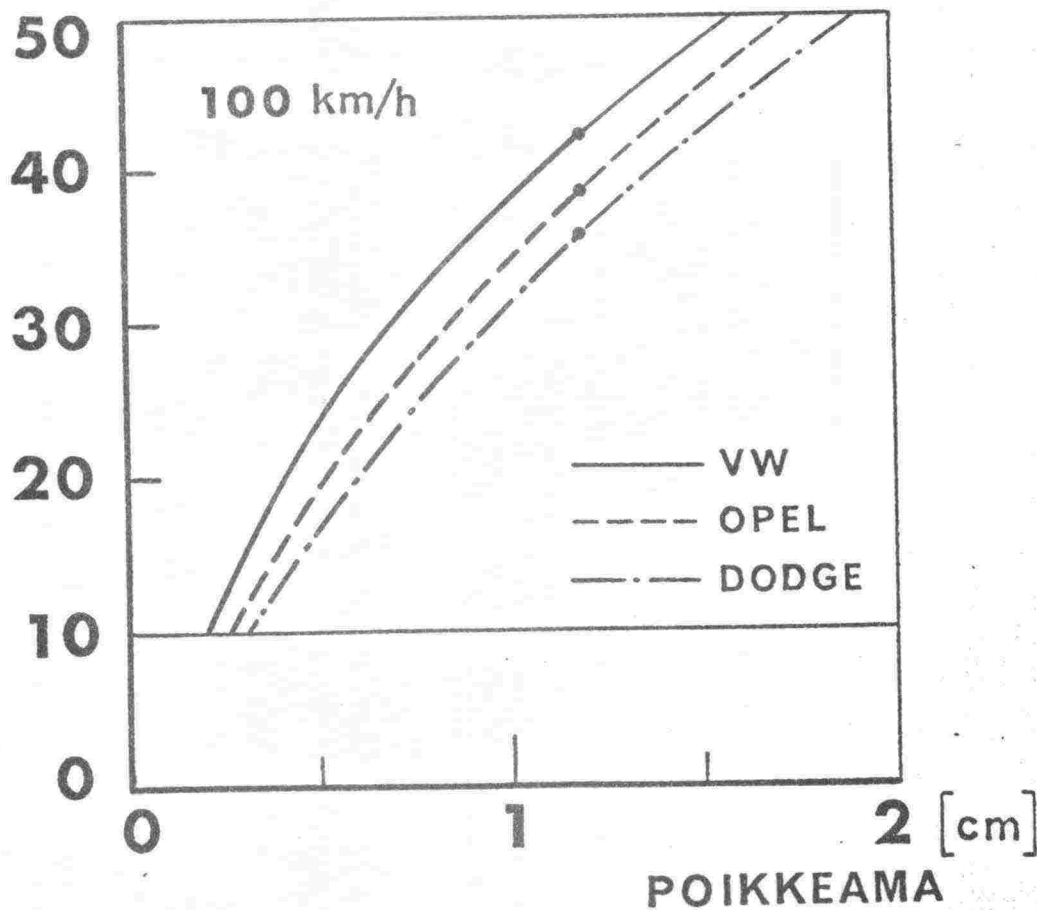
Ajomukavuus ei ole makuasia, vaan verraten tarkoin analysoitavissa oleva suure. Tiivistämisellä on siihen yhteys tien tasaisuuden välityksellä ja tältä osin tiivistämisen hyöty ilmenee parempana liikenteen palveluna.

HAITTA-ASTE



Kuva 5. Loivien epätasaisuuksien aiheuttamat haitta-asteet

HAITTA-ASTE



Kuva 6. Loivien epätasaisuuksien aiheuttamat haitta-asteet



### 1.3 EPÄTASAISUUDEN VAIKUTUS TIENPIDON KUSTANNUKSIIN

Asiaa tarkasteltu yleisluontoisesti muualla (Vtt:n julkaisu n:o 159, Helsinki 1970). Tässä yhteydessä vertailu huonosti kestäneen tien (Inkoo-Virkkala) ja hyvin kestäneen tien (Otaniemen yhdystie) välillä, joiden uudelleenpäällystäminen tapahtuu kesällä 1971.

Teiden tähänastiset kokonaisliikennemäärät:

	Inkoo-Virkkala 1965-71	Otaniemen yhdystie 1962-71
Autoja yhteensä	n. 2 milj.	n. 50 milj.
Liikennekuormitus	n. 7 milj.brt.	n. 110 milj. brt.

Otaniemen yhdystie on 3 (osittain 4) vuotta vanhempi ja kokonaisliikenteeltään 15-25 -kertainen. Rakenne on muuten sama kuin Inkoon-Virkkalan maantiellä (Tvh:n aik.lk. I A), mutta kantavan kerroksen yläosana on imeytys murskesoran sijasta ja osalle tietä on tehty myöhemmin pintakäsittely. Otaniemen tien päällyste on kulu-  
nut, mutta muuten tie on ollut varsin tasainen, kun taas Inkoon-Virkkalan tie on alusta alkaen ollut "töyssyinen". Viimemainitun pohjamaana on suhteellisesti enemmän savea, mutta se ei riitä selittämään ennenaikaista uudelleenpäällystämisen tarvetta. Ilmeinen selitys on puutteellinen tiiviys, jota osoittaa lisäksi sulamis- ja jälkitiivistymisonkaloiden muodostuminen päällysteen alle ja reunoille.

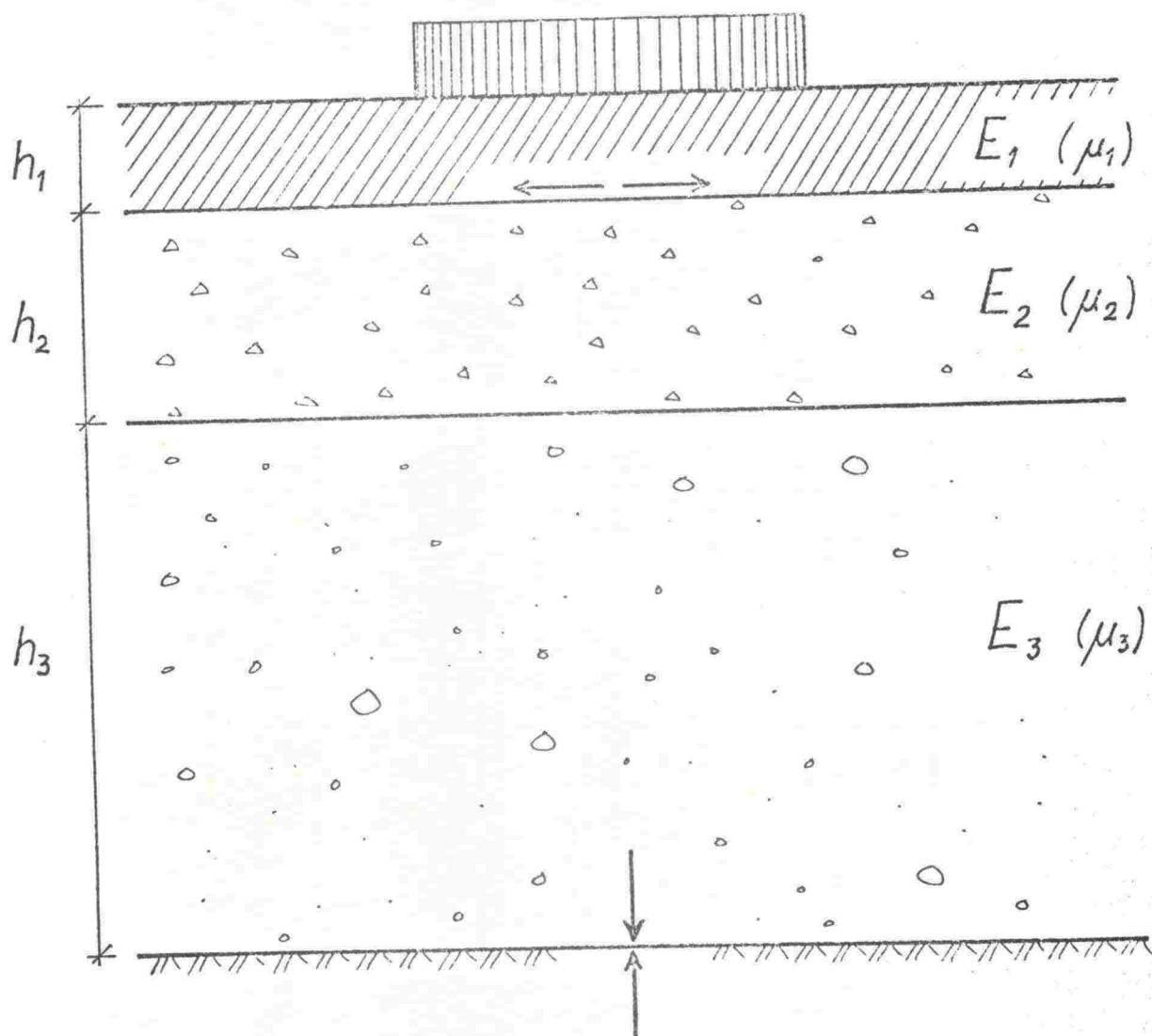
Vaikka tätä huonosti kestänyttä tietä olisi joltakin osalta jyrätty tarpeeksikin, on sen päällystäminen tapahtunut suhteellisesti ottaen liian aikaisin. Uudelleenpäällystämisen osalta ovat tiekustannukset yhtä ajoneuvoa kohti 15-25 -kertaiset Otaniemen tiehen verraten.

Tien rakenteellisen kantavuuden ja tiivistämisen yleinen tavoite: päällysteen on vaurioiduttava kulumalla, ei halkeillen eikä epätasaiseksi tullen.

## 2. TIIVISTÄMISTARVE TIEN KANTAVUUSVAATIMUSTEN VALOSSA

### 2.1 MITOITUSMENETELMIEN POHJAUTUMINEN KIMMO-MODULEIHIN

Teoreettisesti tien päällysrakenteen mitoitusmenetelmät lähtevät useimmiten kuvan 7 mukaisesta tilanteesta-



Kuva 7. Teoreettisissa tien päällysrakenteen mitoitusmenetelmissä lähtökohtana käytetty tien rakenne

ta. Kuormituksen ja pohjamaan välissä on 2 tai useampia rakennekerroksia. Kriittiset jännitykset ovat erityisesti taivutusvetojännitys päällysteen alapinnassa ja pystyjännitys pohjamaan yläpinnassa. Rakennekerroksia voidaan laskelmissa luonnehtia vain kimmomodulilla  $E$  (Poissonin luku  $\mu$  on eri aineksilla likimain vakio).

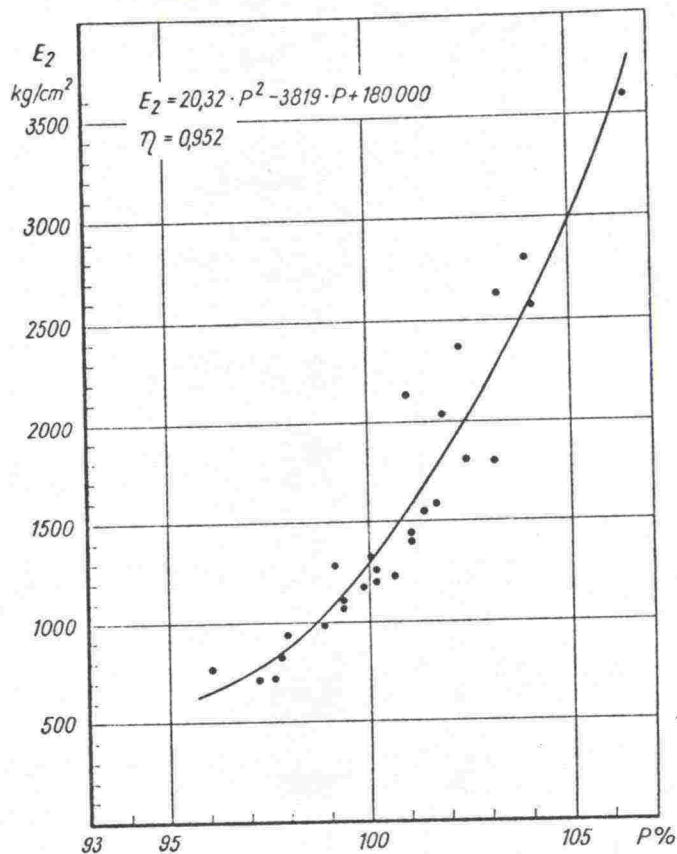
Mitoituksen tuloksena saatavat rakennepaksuudet  $h$  riippuvat huomattavasti laskelmien pohjana olevista  $E$ -arvoista. Jos sitomattoman kerroksen  $E$ -arvoksi on otettu  $3000 \text{ kg/cm}^2$ , voidaan selvittää  $15 \text{ cm:n}$  paksuudella, mutta jos  $E$ -arvo todellisuudessa onkin  $1500 \text{ kg/cm}^2$ , tarvittaisiin  $20 \text{ cm:n}$  paksuus. Lisäys on suhteellisesti suuri ja jos kerros jää ohuemmaksi, on seurauksena jännitysten kasvaminen sallittua suuremmiksi ja päällysteen ennenaikainen vaurioituminen.

## 2.2 KIMMOMODULIEN JA RAKENNEPAKSUUDEN RIIPPUVUUS TIIVIYDESTÄ

Kuva 8 esittää kimmomodulin riippuvuutta tiiviysasteesta eräillä Helsingin ympäristön vanhoilla teillä (maa-aines soraista hiekkaa). Riippuvuus on tässä varsin voimakas; jos maa-aines on kivisempää ja kosteampaa, kasvaa kimmomoduli yleensä hitaammin. Lopullinen kimmomoduli (maa-aineen ollessa luonnonmukaisessa tasapainokosteudessa) on kuitenkin mitä selvimmin riippuvainen maa-aineen tiiviyydestä.

Kaiken laskennollisen tai kokeellisen tierakenteen mitoittamisen eräs edellytys on, että maa-aineen tiiviys on olettamusten mukainen. Muussa tapauksessa on mitoituksen  $\text{cm-luvuilta}$  pohja poissa. "Soraa  $20 \text{ cm}$ " on riittämätön rakenneohje kestopäällysteen yhteydessä, ellei tiedetä, minkälaista sora on ja millä tavoin se työkohteessa käsitellään. Tämä edellyttää tiivistämistoiminnan luotettavuutta.





Kuva 8. Kimmomodulin riippuvuus tiiviysasteesta eräillä Helsingin ympäristön vanhoilla teillä

### 3. MIKSI SIIS TIIVISTETÄÄN?

Tierakenteen aktiivista tiivistämistä vaatii 2 syyryhmää: valmiin tien tasaisuuteen kohdistuvat vaatimukset sekä tien kantavuuteen kohdistuvat vaatimukset. Molemmat ovat tärkeitä, mutta tien myöhempään laatuun liittyvät tasaisuusvaatimukset ovat olennaisin syy, miksi tiivistetään.

Aktiivinen tiivistäminen (kaluston valinta, kerrospak-  
suudet, työn ajoitus, tiivistämistyön määrä, veden le-  
vitys, työn tarkkailu jne.) on optimointikysymys, jossa  
työn ym. määrälle on olosuhteista riippuvat kannattavuus-  
den ylärajat. Apuna ovat riittävän pitkä rakennusaika  
ja työmaan aikainen liikenne. Rakenteen kannalta sen  
kokonaistiiviys sitä vastoin ei ole optimointikysymys  
vaan: mitä tiiviimpi, sitä parempi.



Tekn. tri Eero Lehtipuu

## II TIIIVISTÄMISEN TEORIAA

## II TIIIVISTÄMISEN TEORIAA

## JOHDANTO

Maan tiivistäminen tarkoittaa maa-aineksen huokoisuuden pienentämistä ja samalla tilavuuspainon nostamista mekaanisin keinoin. Jos mukana on muita aineita kuin vettä, käytetään nimitystä lujitus (stabilointi).

Tiivistämisen teoria ja käytäntö eroavat useassa suhteessa sen mukaan, onko maa-aines koheesiomaata (runsaasti hienoaainesta mukana) vai kitkamaata. Koheesiomaat ovat tyypillisiä mm. maapatotöissä, tienrakennuksessa taas pohjanvahvistustöitä lukuunottamatta ovat kitkamaat yleisempiä.

## 1. MAA-AINEKSEN OLOTILAN YHTÄLÖ

Maa-aineksen huokokset ovat veden tai ilman täyttämiä. Kun kitkamaissa ei yleensä ole vettä liikaa, on pääasiana saada ilmatilavuus pienemmäksi.

Maa-aineksen kuivatilavuuspaino osoittaa välillisesti sen tiiviyyden. Se voidaan laskea niin pian kuin tunnetaan ilmatilavuus ja vesipitoisuus (maa-aineksen ominaispaino vakio) seuraavasta kaavasta:

$$\gamma_k = \frac{(1 - V_i) \cdot \gamma_s}{1 + \frac{w}{100} \cdot \gamma_s},$$

jossa  $\gamma_k$  = maa-aineksen kuivatilavuuspaino,

$V_i$  = ilmatilavuus suhteena koko tilavuuteen

$\gamma_s$  = maa-aineksen ominaispaino  $\sim 2,65$

$w$  = vesipitoisuus paino-%

Yhtälön johto on kuvassa 1 ja sitä voidaan kutsua maa-aineksen olotilan yhtälöksi, koska se määrittlee riippuvuudet maa-aineksen kaikkien kolmen ainesosan välillä. Jos kuivatilavuuspaino tunnetaan, voidaan sen avulla kääntäen laskea ilmatilavuus prosentteina.

	Tilavuus	Paino	Ominaispaino
ilma	$V_i$	0	0
vesi	$\frac{w}{100} \cdot \frac{\gamma_k}{\gamma_w}$	$\frac{w}{100} \cdot \gamma_k$	$\gamma_w$
maa	$1 - V_i - \frac{w}{100} \cdot \frac{\gamma_k}{\gamma_w}$	$\gamma_k$	$\gamma_s$

Paino = Tilavuus  $\cdot$  Ominaispaino:

$$\frac{w}{100} \cdot \gamma_k + \gamma_k = \frac{w}{100} \cdot \frac{\gamma_k}{\gamma_w} \cdot \gamma_w + \left(1 - V_i - \frac{w}{100} \cdot \frac{\gamma_k}{\gamma_w}\right) \cdot \gamma_s$$

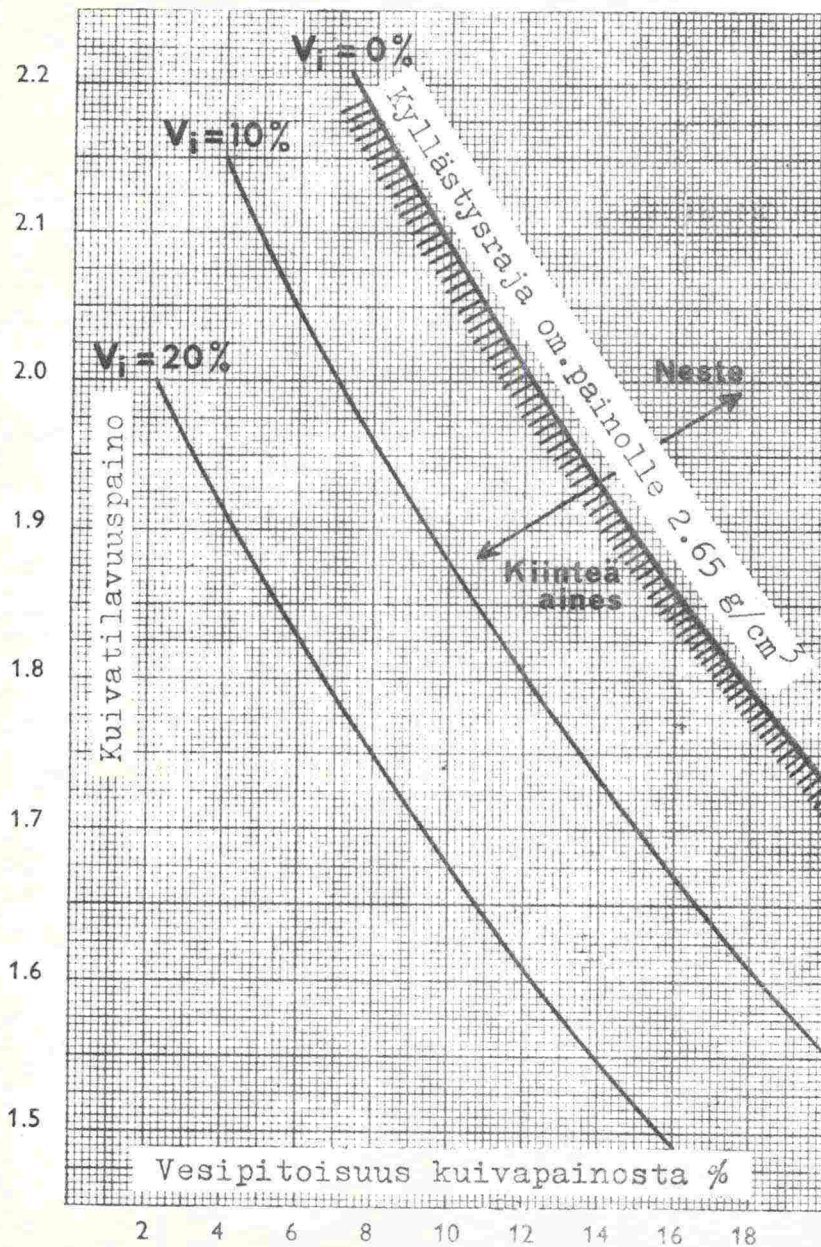
$$\gamma_w = 1$$

$$\gamma_k = \frac{(1 - V_i) \cdot \gamma_s}{1 + \frac{w}{100} \cdot \gamma_s}$$

Kuva 1. "Maa-aineksen olotilan yhtälö"



Kuva 2: Vesipitoisuuden ja kuivatilavuuspainon muodostamaan akselistoon voidaan sijoittaa jokaista maa-aineksen olotilaa kuvaava piste. Mitä etäämpänä piste on kyllästysrajasta, sitä suurempi on sen ilmatilavuus (kyllästysrajalla ilmatilavuus  $V_i = 0$ ). Jokainen "olotilapiste" sijaitsee kyllästysviivan vasemmalla puolella; sen oikealla puolella oleva piste ei kuvaa enää



yhtälö:

$$\gamma_k = \frac{2,65}{1 + \frac{w}{100} \cdot 2,65}$$

Kuva 2. Maa-aineksen olotilan kuvaus

kosteata maata vaan vettä, jossa ui maakappaleita. - Tiivistämisen tavoitteena on päästä mahdollisimman lähelle kyllästysrajaa huomioonottaen, että kuivatilavuuspainon on samalla oltava mahdollisimman korkea. Rajaviivaa on siten pyrittävä lähestymään sen yläosassa.

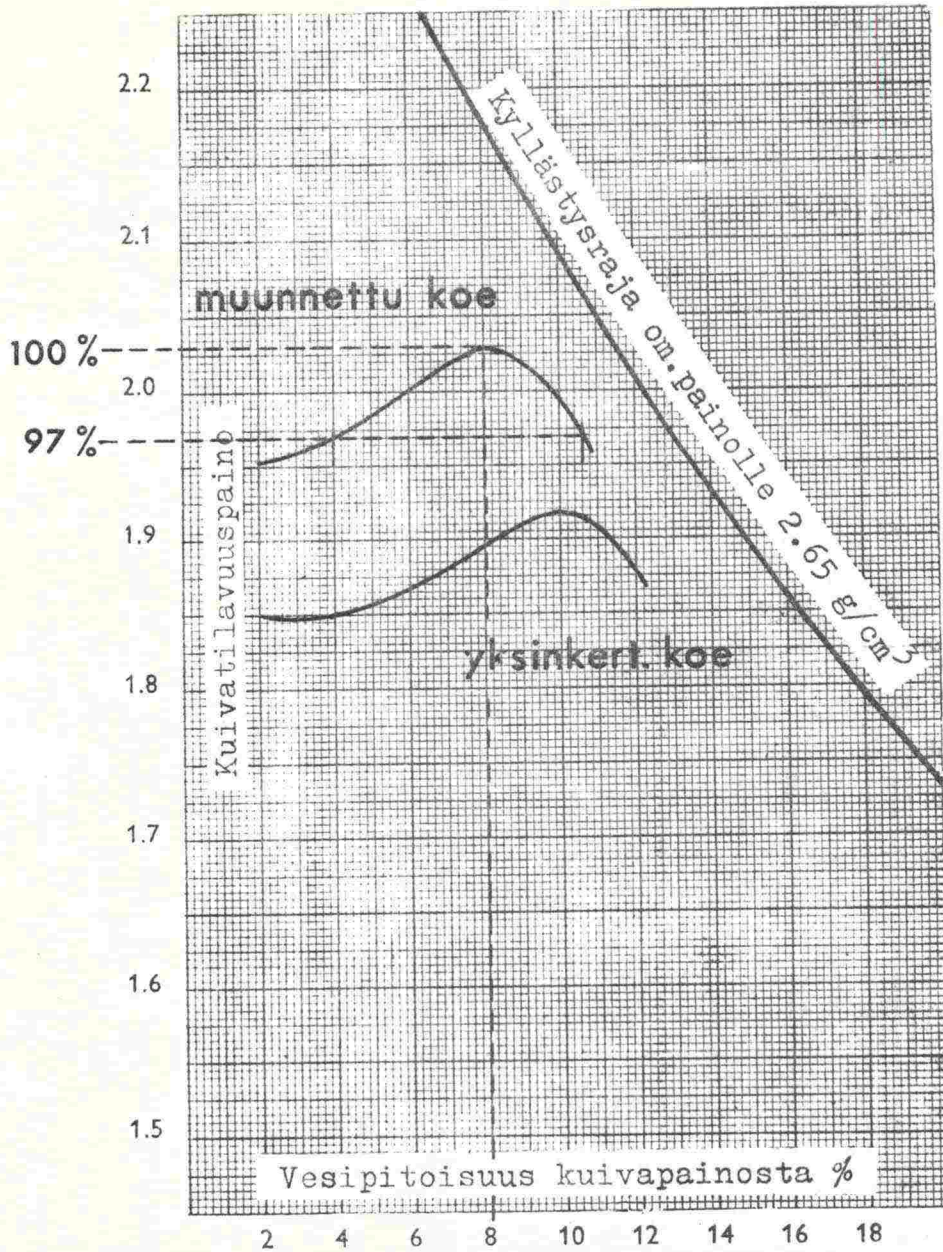
Tiiviysvaatimusta ei käytännössä ilmaista kuivatilavuuspainona vaan tiiviysasteena eli kentällä mitatun kuivatilavuuspainon suhteena laboratoriossa saatuun Proctor-kokeen kuivatilavuuspainoon. Tämä sen vuoksi, että maa-aineksen rakeisuus ja raemuodon vaikutus saadaan samalla tasapuolisesti mukaan. - Koheesiomaissa on Proctor-koe hankala ja tiiviysvaatimus esitetään toisinaan suurimpana sallittuna ilmatilavuutena, joka lasketaan maa-aineksen olotilan yhtälöstä. (Esim. Saksassa saa tiepenkereen koheesiomaan  $V_i$  olla enintään 12 % edellyttäen, että vesipitoisuus ei ylitä likimääräistä optimia. Englannissa vastaava vaatimus on 10 % jne.)

## 2. VEDEN VAIKUTUS TIIVISTETTÄVYYTEEN

Proctor-koe (kuva 3) osoittaa vesipitoisuuden vaihtelun vaikutusta maa-aineksen kuivatilavuuspainoon. Koe edellyttää tiivistystyön pysymistä vakiona (muunnetussa kokeessa se on 10-kertainen ns. yksinkertaiseen kokeeseen verrattuna).

Kuivatilavuuspainon nousu vesipitoisuuden aluksi noustessa aiheutuu maarakeiden välisen kitkan pienentymisestä, jolloin sijoittuminen tiiviimpään järjestykseen käy päinsä. Optimivesipitoisuudessa rakeiden välinen kitka on pienimmillään. Vesi toimii siten maaseoksessa välttämättömänä voiteluaineena. Kun vesipitoisuus vielä kasvaa,





Kuva 3. Proctor-kokeen käyrät

muodostaa sen hydrostaattinen jännitys tiivistysvas-  
tuksen, joka imee osan tiivistysenergiasta ja kuivati-  
lavuuspaino jää maksimia pienemmäksi. Veden vaikutus  
on koko ajan välillinen ja kuivatilavuuspainon pienene-  
minen ei johdu siitä, että veden ominaispaino on pie-  
nempi kuin maan ja kun vettä on enemmän, tämä tekisi  
seoksen kevyemmäksi.

Proctor-käyrä on yleensä kupera, alaspäin aukeava. Pienillä vesipitoisuuksilla voi käyrä olla "ylösalaisin", jolloin kuivatilavuuspaino aluksi pienenee, kun vesipitoisuus kasvaa 0 %:sta lähtien. Tämä johtuu lähinnä siitä, että maarakeet peittyvät ensin ohuella absorptiovesikalvolla, jolloin ne etääntyvät toisistaan ja kuivatilavuuspaino pienenee huolimatta samaan aikaan tapahtuvasta kitkan pienentymisestä. Ilmiö on tyypillinen tasarakeisissa maalajeissa, mutta niidenkin lopullinen optimivesipitoisuus on aina enemmän kuin 0 %.

Optimivesipitoisuudessa maa-aines saavuttaa kuivatilavuuspainon maksimin, mutta se edellyttää tiettyä, koelle ominaista tiivistystyö määrää. Jos tätä lisätään, päästään maksimiin pienemmällä vesipitoisuudella. Optimivesipitoisuus on käytännön tiivistyksessä eräs taustatieto, ei itsetarkoitus. Tietynsuuruinen, kulloisenkin vaatimuksen mukainen kuivatilavuuspaino on numeerisista tavoitteista tärkeämpi.

Optimivesipitoisuus voitaisiin laskea myös teoreettisesti lähtemällä maa-aineksen rakeisuudesta ja laskemalla sen pinnalleen pidättämä vesikalvo, kapillaarivoimat jne. samaan tapaan kuin voidaan laskea bitumipitoisuuden optimi asfalttimassalle. Nämä laskelmat ovat kuitenkin tarpeettomia, koska Proctor-koe antaa tuloksen helpommin ja luotettavammin.

### 3. MAA-AINEKSEN MUU KÄYTTÄYTYMINEN TIIVISTETTÄESSÄ

Maa-aineksen tiivistyminen voi periaatteessa tapahtua myös rakeiden rikkoutumisena ja yksittäisten rakeiden kokoonpuristumisena. Suomen lujilla kiviaineksilla nämä ovat merkityksettämiä ja tärkein tiivistymisen muoto on rakeiden uudelleen järjestyminen kuormituksen vaikutuksesta. Uudelleen järjestyminen toistensa lomiin merkit-



see käytännössä useammin tilavuuspainon kasvua kuin sen pienentymistä. (Maalajia rakenteeseen tiivistettäessä päästään aina suurempaan tilavuuspainoon kuin mitä vastaava aine on ollut luonnontilaisena. VTT:n Tielaboratorion löyhtymiskerrointutkimuksen mukaan eri maalajien rakennetilavuus oli 0,86 - 1,01 kertaa samojen maalajien alkuperäinen kiintotilavuus, jos tiivistysvaatimuksena oli 90 % muunnetusta Proctor-kokeesta.)

Kiinteän aineen, kuten maan lyhytaikainen muodonmuutos on joko kimmainen tai plastinen sen mukaan, palautuuko muodonmuutos ennalleen kun ulkoinen voima poistuu vai ei. Maan tiivistyminen (rakeiden uudelleen sijoittuminen ja ilmahuokosten pienentyminen) on olennaisesti plastinen, pysyvä tapahtuma. Tästä aiheutuu, että mitä plastisempaa (pehmeämpää tai löyhempää) maa-aines on, sitä enemmän se "imee" tiivistystyötä itseensä ja sitä vähemmän tiivistyspaineesta välittyy syvemmälle. Kun maarakeet ovat sijoittuneet lähemmäksi toisiaan, plastisuus vähenee ja kimmoisuus lisääntyy. Tällöin ulkoiset voimat etenevät myös helpommin. Tiivistyskoneen syvyysvaikutus ei sen vuoksi ole vakio vaan riippuu myös maa-aineksen tiiviyydestä.

Tiivistyksen valvonnassa tutkitaan plastisuuden ja kimmoisuuden välistä tilannetta levykuormituskokeen antamien tulosten suhteen  $E_2/E_1$  avulla, joka ei saa ylittää tiettyä arvoa. Mitä plastisemmin maa käyttäytyy, sitä suurempi on ensimmäisen kokeen painuma ( $E_1$  on pieni) ja samalla suhde  $E_2/E_1$ . Mitä kimmoisempi maa on, sitä enemmän ensimmäinen koe muistuttaa toista ja sitä pienempi ko. suhde on.

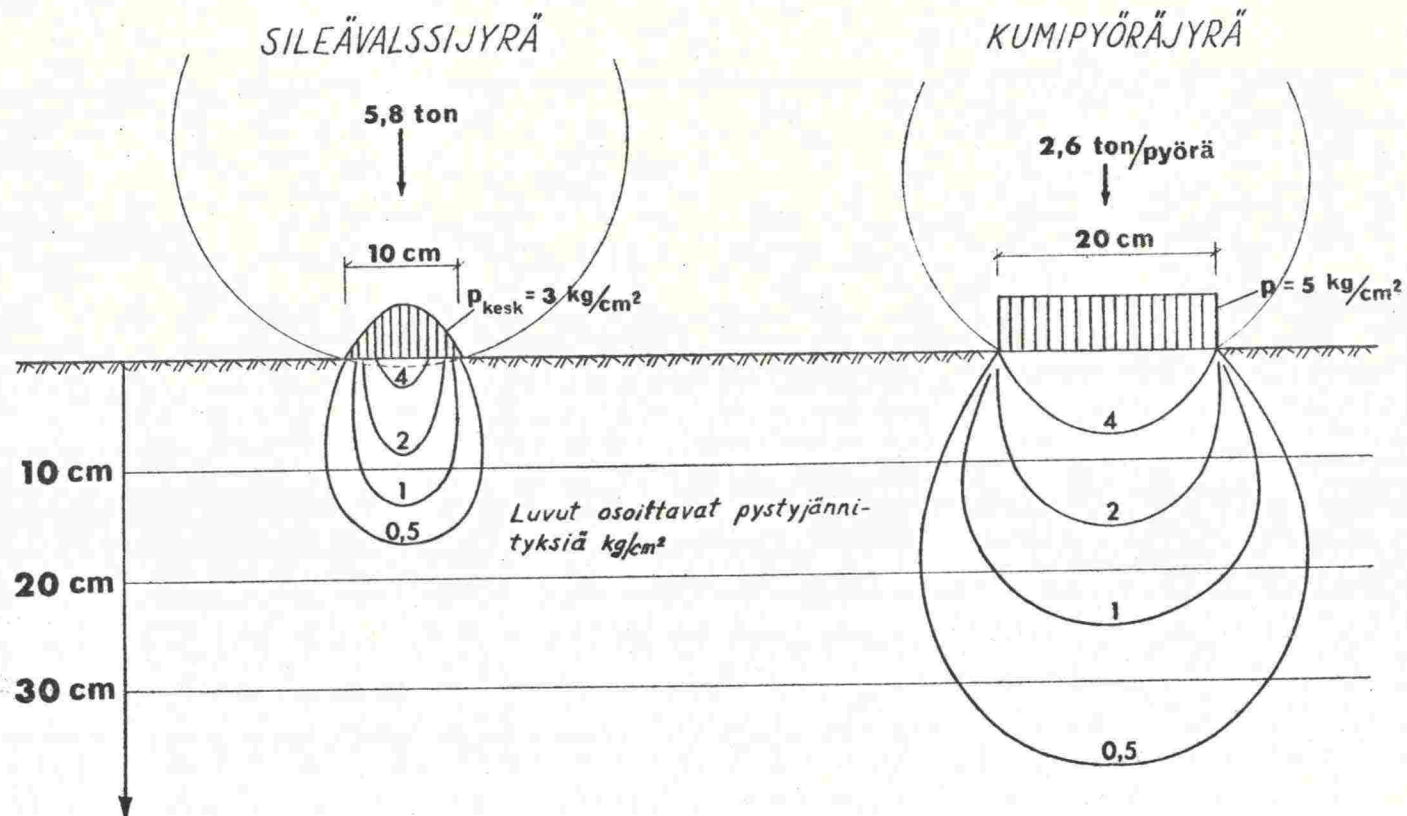
#### 4. PAINEEN LEVIÄMINEN KONEESTA MAAHAN

Homogeenisessa maassa leviää paine paikallaan seisovasta tai hitaasti liikkuvasta (ilman täryä) tiivistyskoneesta



# PAINEEN STAATTINEN JAKAUTUMINEN

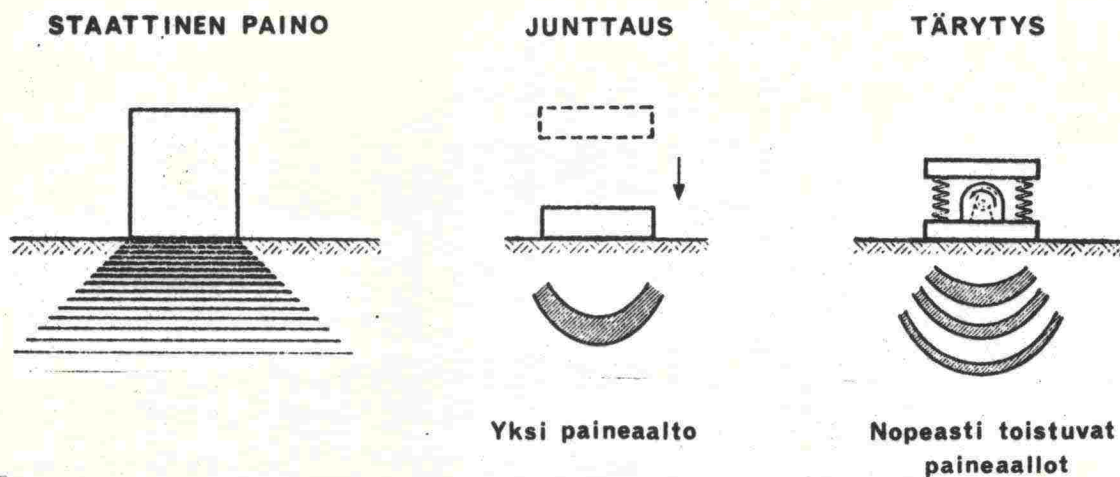
Kuva 4. Paineen staattinen jakautuminen



kuvan 4 osoittamaan tapaan. Jäykän valssin ja maan välinen kosketuspaine ei ole vakio vaan on suurimmillaan keskellä ja pienenee sieltä 0:aan reunalle tultaessa. Kosketuspaine on epätasainen jokaisen jäykän kuormittajan, esim. levykuormituskokeen levyn alla, mutta jyrällä paineen keskittyminen korostuu vielä valssin pyöreydestä. Kuvassa 4 kosketuspinnan leveydeksi on otaksuttu 10 cm; lujalla pinnalla se voi olla vielä kapeampi, jolloin syvyysvaikutus on vastaavasti pienempi. Sileävalssijyrän syvyysvaikutus on kaikkiaan pieni ja rajoittuu käytännössä maan pintaan.

Kumipyöräjyrän kosketuspaine on likimain vakio (kuva 4). Se ei kuitenkaan ole sama kuin rengaspaine vaan muuttuu rengaspaineen noustessa tai laskiessa tätä hitaammin. Leveämmän kosketuspinnan ansiosta paine leviää paljon syvemmälle kuin sileävalssijyrästä. Kun samassa akselissa on 4-5 pyörää, ulottuu lisäksi näiden yhteinen paine-piiri tien poikkisuunnassa syvemmälle kuin pelkkien yksittäispyörien vaikutus.

Tärytys lisää tiivistämisenergiaa ja parantaa valssijyrän mahdollisuuksia ratkaisevasti. Kaavamaista toimintatapaeroa eri menetelmien välillä esittää kuva 5 (Forssblad). Tärytyksen teho perustuu siihen, että maarakeiden kitka hetkellisesti miltei kumoutuu ja rakeiden uudelleen järjestäytyminen voi tapahtua suhteellisen pinelläkin paineella. Pelkkää paineen suuruutta tärkeämpiä ovatkin värähtelyn taajuus ja amplitudi, erityisesti viimeksimainittu ratkaisee koneen syvyysvaikutuksen. - Syvyys - enempää kuin vaakasuuntaistakaan tiivistyskoneen vaikutusalue ei voi päätellä siitä, missä ihminen tuntee koneen liikkeen. Vaikutusalue on kulloinkin se, missä maa-aineksen rakenne (tiiviyys) vielä muuttuu ja se riippuu paitsi koneesta leviävästä paineesta, myös sen dynaamisista vaikutuksista ja maa-aineksen sen hetkisestä tiiviyydestä, rakeisuudesta ym.



Kuva 5. Eri tiivistämismenetelmien kaavamainen toimiero

#### 4.1 Miksi tiivistettävän kerroksen yläpinta voi löyhetyä

Usein saavutetaan pintaa suurempi tiiviys 10...30 cm syvyydessä, tyypillisimmin tasarakeisissa kitkamaalajeissa. Pääsyy on, että maa-aineksen kantavuus ylitetään. Kitkamaalajien, esim. hiekan kantavuus on kylä riittävä alaspäin kohdistuvaa puristusta vastaan, mutta kun jyrä ohittaa tietyn pisteen, suuntautuu tähän sen jälkeen sivusuuntainen voima jyrän valssista. Yhdessä kimmoisesta maanpinnan nousemasta aiheutuvan pystykomponentin kanssa kohdistuu maahan valssin ylimenon jälkeen loivasti ylöspäin suuntautuva voima, joka pyrkii löyhdyttämään maan pintaa. Tärytys yleensä tehostaa vaikutusta, ellei maassa ole mukana hienoaainesta, joka sitoisi sitä kriittisimmällä hetkellä ja ellei laite itse muodosta vastapainoa (tärylevyt).

Löyhtymistä voi aiheutua myös silloin, kun koneella, joka sinänsä ei ole liian painava, jyrätään pitkän aikaa. Syy on tällöin se, että vaikka kantavuus tiivistettäessä lisääntyy, kasvaa maa-aineksen paineenjohtavuus vielä



enemmän, jolloin pinnan vastustuskyky sivulle ja osittain ylöspäin suuntautuvia paineaaltoja vastaan on heikompi kuin hiukan vähemmällä tiivistyksellä. Löyhtymistaipumista lisää se, että jatkuvasti jyrättäessä hyvin vettäläpäisevä maa kuivuu ja veden sitova näennäiskoheusio pienenee.

Yleensä: mitä suurempi on tietyntyyppisen tiivistyskoheen syvyysvaikutus, sitä suurempi mahdollisuus sillä on myös löyhdyttää pintaa. Pintalöyhtymisen haitta on pieni monikerroksisen rakenteen tiivistämisessä ja yleensä pahin välittömästi kestopäällysteen alla.

#### 5. TIIVISTETTÄVYYDEN RIIPPUVUUS ALUSTAN KANTAVUUDESTA

Mitä lujempi pohja tiivistettävän kerroksen alla, sitä helpompaa tiivistäminen on ja sitä parempi tulos saavutetaan. Syynä on paineen jakautumisen erilaisuus. Tarkastellaan asiaa teoreettisesti kuvan 6 mukaan.

Kuvassa on kolme pohjamaatyyppiä ja kaikilla samanlainen kuormitus, staattinen levy. Kun levyn mitat ja kuormitus, ylemmän maakerroksen paksuus ja kimmomodulit oletetaan tunnetuiksi, voidaan laskea toisaalta levyn kokonaispainuma maan pinnalla, toisaalta ylimmän 30 cm:n maakerroksen kokoonpuristuma kussakin tapauksessa. Kokonaispainuma on sitä pienempi, mitä kantavampi alusta on, mutta ylempi 30 cm:n kerros puristuu sitä enemmän kokoon, mitä kantavampi sen alusta on. Jännitysteoreettisiin laskelmiin perustuvat numeeriset suhteet ilmenevät kuvasta 6.

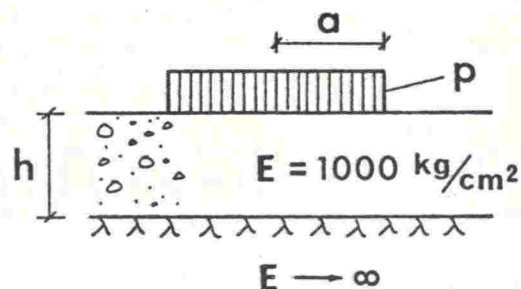
Kun kuormituksena on levyn sijasta liikkuva jyrä, ei numeerisia arvoja voida laskea yhtä tarkasti, mutta pääasia on sama: tietyn aineksen kokoonpuristuminen (tii-

# LEVYN PAINUMINEN ERILAISILLA ALUSTOILLA

$$h = a = 30 \text{ cm}, \quad p = 6 \text{ kg/cm}^2$$

Kuva 6. Levyn painuminen erilaisilla alustoilla

## ① MAAN ALLA KALLIO

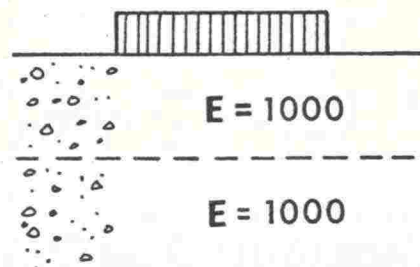


Koko painuma = 2,30 mm

Maapatjan osuus = 2,30 mm

Maan kokoonpuristuminen on 14 % suurempi kuin homogeenisella pohjalla

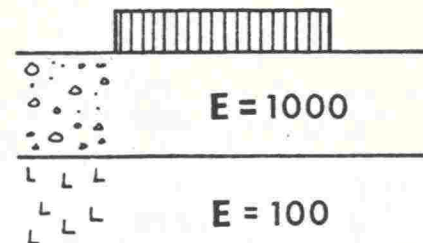
## ② HOMOGEEENINEN MAA



Koko painuma = 2,70 mm

Maapatjan osuus = 2,02 mm

## ③ MAAN ALLA PEHMEIKKÖ



Koko painuma = 13,00 mm

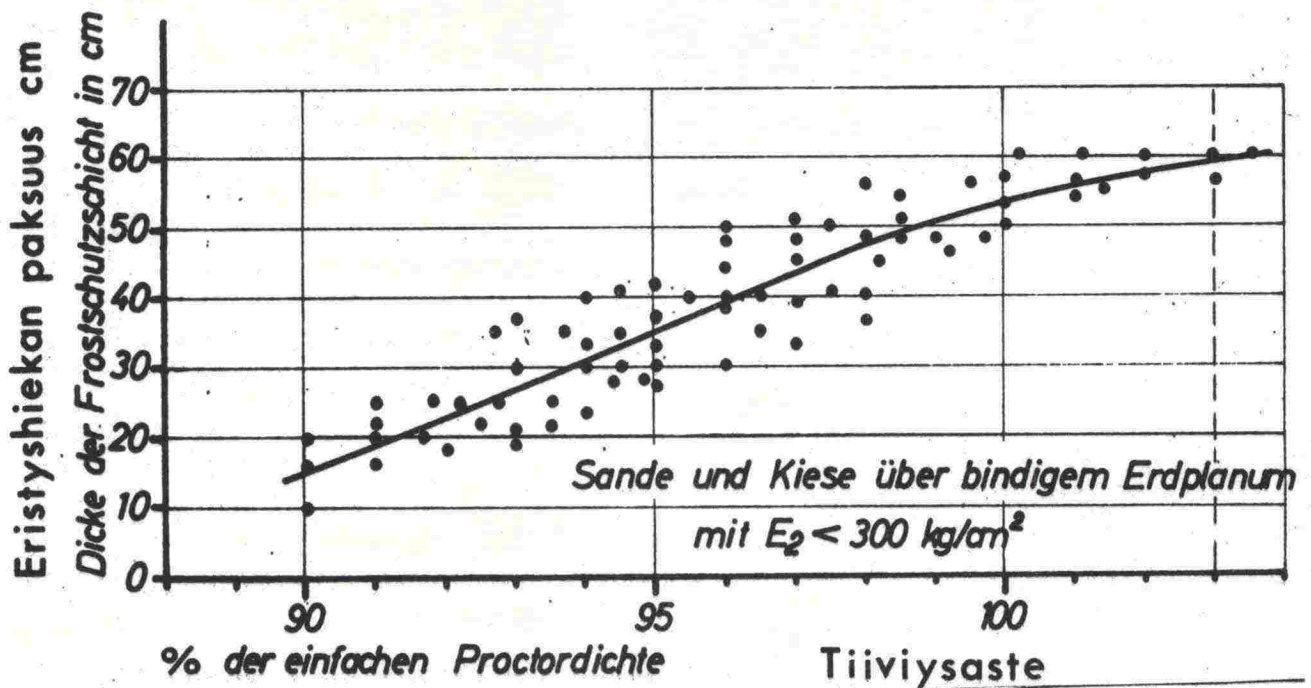
Maapatjan osuus  $\approx$  1,57 mm

Maan kokoonpuristuminen on 22 % pienempi kuin homogeenisella pohjalla

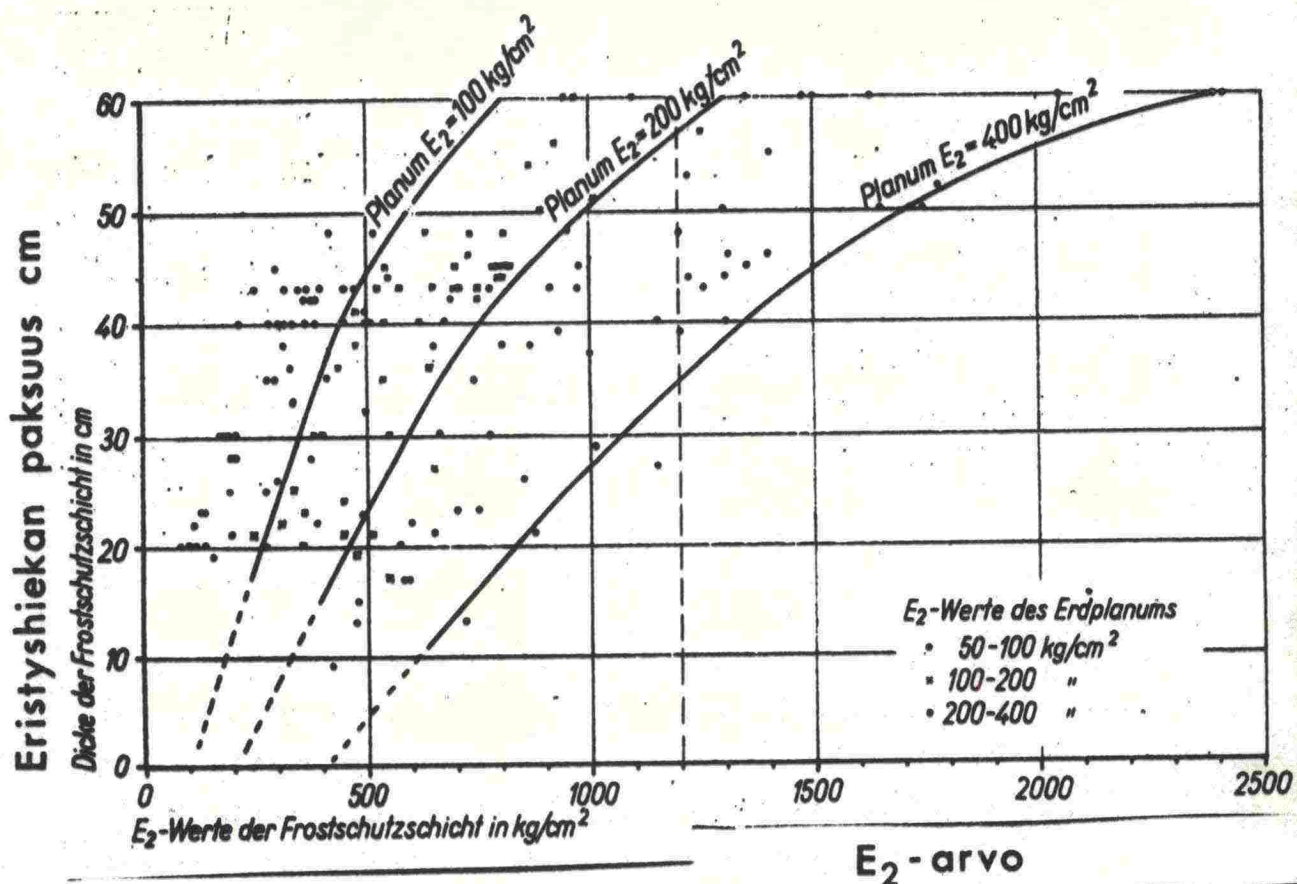


vistyminen) on sitä helpompaa, mitä lujempi sen alusta on. Syynä on se, että jos pohja on kova, paine jakautuu pienemmälle alalle ja tiivistyminen tehostuu. Jos pohja on pehmeä, koneesta tuleva energia "hukkuu" laajalle alalle pehmeään alustaan ja teho on huonompi.

Kuvat 7 ja 8 esittävät saksalaisia koetuloksia eristys-hiekan tiivistämisestä pehmeällä pohjamaalla (Voss: Lagerungsdichte und Tragwerte von Böden bei Strassenbauten, Strasse und Autobahn 4/1961). Kuvassa 7 on tiivistysasteen riippuvuus eristyshiekan paksuudesta, kun alustan  $E_2$ -arvo on alle  $300 \text{ kg/cm}^2$ . Näin heikolla pohjamaalla on vaadittuun 103 % tiiviyyteen (yksinkert.koe) päästy vasta kun hiekkaa on lähes 60 cm.



Kuva 7. Tiivistysasteen riippuvuus eristyshiekan paksuudesta



Kuva 8. Levykuormituskoneen E<sub>2</sub>-arvon riippuvuus eristyshiekan paksuudesta ja pohjamaan kantavuudesta

Kuva 8 esittää levykuormituskokeen E<sub>2</sub>-arvon riippuvuutta eristyshiekan paksuudesta ja pohjamaan kantavuudesta. Vaadittuun arvoon 1200 kg/cm<sup>2</sup> on päästy 35 cm:n hiekkakerroksella, jos pohjamaan kimmomoduli on ollut 400 kg/cm<sup>2</sup>. Heikommilla pohjamailla on tarvittu vastaavasti n. 57 ja n. 70 cm:n hiekkakerros. Pehmeällä alustalla on näidenkin mukaan vaikeata ja äärimmäistapauksessa suorastaan mahdotonta päästä vaatimustarvoihin (Suomen tiiviysvaatimukset ovat jonkin verran lievemmat kuin Saksan).

Ins. T. Siiskonen

III MILLÄ TIIIVISTETÄÄN -  
TIIIVISTYSKONEET

### III MILLÄ TIIVISTETÄÄN - TIIVISTYSKONEET

- tiivistyskaluston toimintaperiaatteiden ja rakenteen tarkastelua lähinnä koneteknilliseltä kannalta

#### JOHDANTO

Maanteiden nykyinen rakennustapa edellyttää, että rakennusmateriaali tiivistetään välittömästi paikalle-ajon jälkeen. Tiivistyskaluston tarve on siten voimakkaasti lisääntynyt ja samalla on mielenkiinto niiden suunnittelua ja kehitystä kohtaan huomattavasti kasvanut. Pyrkimyksenä on ollut kehittää jyrätyyppejä ja niiden rakenteellisia ominaisuuksia siten, että ne mahdollisimman hyvin soveltuisivat erilaisten maa-lajien tiivistykseen.

Koska rakentamistavat ja rakennusmateriaalit ovat hyvin erilaisia eri puolilla maailmaa, on luonnollista, että markkinoille on tullut lukuisa joukko eri tyyppisiä ja painoisia tiivistyskoneita. Seuraavassa käsitellään lähinnä meillä yleisemmin käytössä olevien koneiden toimintaperiaatteita ja rakenteellisia ominaisuuksia.

#### 1. STAATTISESTI VAIKUTTAVAT TIIVISTYSKONEET

Tähän ryhmään lukeutuvat jyrät aikaansaavat tiivistysvaikutuksen lähinnä staattisen paineen vaikutuksesta.



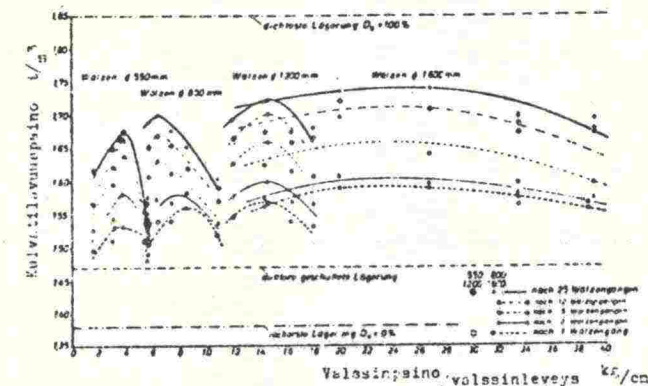
Sen perusteella minkä elimen välityksellä tiivistysenergia siirtyy maahan, voidaan staattiset jyrät jakaa kolmeen pääryhmään.

### 1.1 SILEÄVALSSIJYRÄT

Näissä jyrissä on yksi tai useampia sileäpintaisia valsseja. Rakenteeltaan ne voivat olla vedettäviä tai itsekulkevia. Sileävalssijyrien tiivistysvaikutuksen kannalta on erityisesti seuraavilla koneteknillisillä ominaisuuksilla merkitystä:

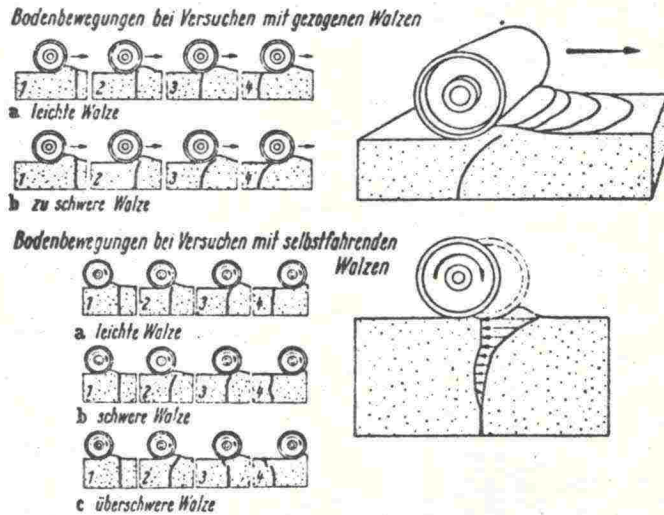
- jyrän paino
- valssin leveys
- valssin halkaisija
- työnopeus

Kaksi ensinmainittua tekijää muodostavat ns. viivapaineen (kp/cm), joka yhdessä valssin halkaisijan kanssa määrittelee tiivistyskyvyn. Tutkimuksissa on voitu todeta, että eri valssin halkaisijoille on viivapaineille optimiarvonsa. Kuvassa 1.1 on esitetty kuivatilavuuspaino viivapaineen funktiona eri valssin halkaisijoilla. Kuvasta voidaan todeta, että pienemmillä halkaisijoilla viivapaine erittäin pienellä alueella antaa tyydyttävän tuloksen.



Kuva 1.1 Kuivatilavuuspaino viivapaineen funktiona eri valssin halkaisijoille

Kun tarkastellaan valssista maahan siirtyviä voimia voidaan todeta, että eri jyrätyypeillä esiintyy pystysuorien voimien lisäksi myös vaakasuoria voimia. Nämä voimat ovat määrääviä jyrän eteenpäinliikkumisen kannalta. Kun tiivistettävä maa ei enää pysty ottamaan vastaan vaakasuorien voimien aiheuttamia leikkausjännityksiä, tulee maa valssin takana suomaiseksi ja vedettävillä jyrillä muodostuu valssin eteen maakasautuma (kuva 1.2)



Kuva 1.2 Valssin eteen muodostuvat maakasautumat

Viivapaineen lisäksi valssin halkaisija vaikuttaa kosketuspinta-alaan ja sitä kautta tiivistyksen syvyysvaikutukseen.

Sileävalssijyrien etuina voidaan pitää mm.:

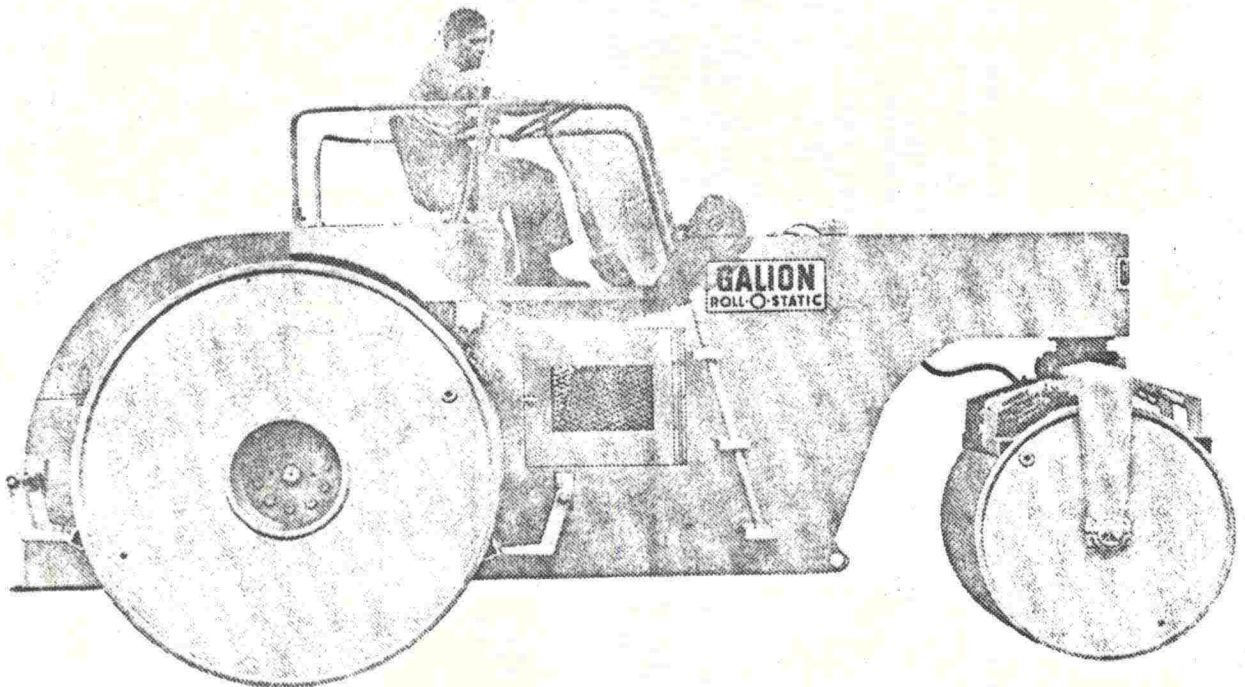
- sileä tiivistysjälki
- yksinkertainen ja käyttövarma rakenne

Haittoja:

- viivapaine vaihtelee tiivistettävän materiaalin epätasaisuuksista johtuen ja aiheuttaa epätasaisen tiiviiden
- syvyysvaikutus on melko pieni

### 1.1.1 Kolmivalssijyrät

Kolmivalssijyrät ovat yleisimpiä sileävalssijyristä ja niiden painot vaihtelevat 3-15 t. Kuvassa 1.3 on Galionin 14 t jyrä, joka muotoilultaan edustaa uusinta suuntaa. Näkyväisyys kuljettajan paikalta on erittäin hyvä.

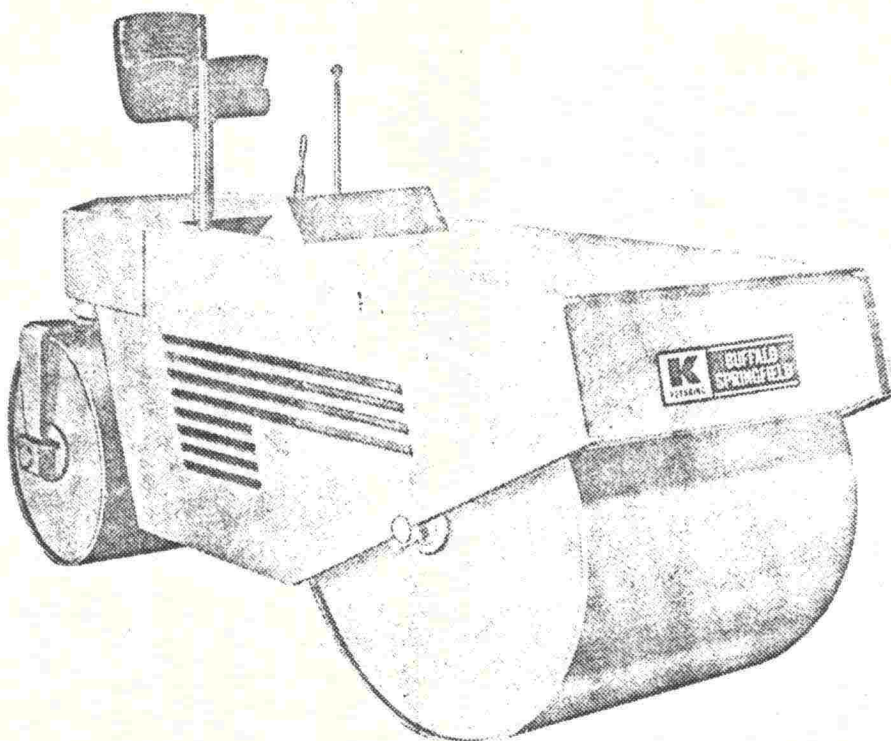


Kuva 1.3 Kolmivalssijyrä

### 1.1.2 Tandemjyrät

Tandemjyrissä on kaksi perättäistä valssia, joista toinen on ohjaava. Myös runko-ohjattuja tyyppejä valmistetaan. Kuvassa 1.4 on Buffalo Springfield S-35 tandemjyrä, jossa on hydrostaattinen voimansiirto ja työnopeudet säädettävissä 0-9 km/h.

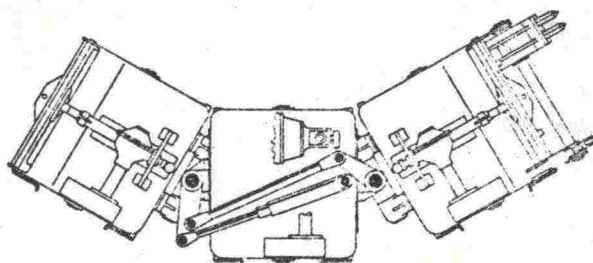
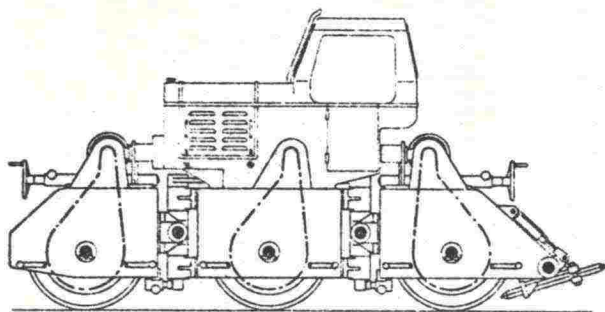




Kuva 1.4 Tandem-jyrä

### 1.1.3 Triplex - jyrät

Triplex-jyrissä on kolme peräkkäistä valssia. Tällä tyypillä on pyritty siihen, että tien pituussuunnassa-kin saavutettaisiin hyvä tasaisuus. Kuvassa 1.5 on tanskalainen Rimas triplex-jyrä.



Kuva 1.5 Triplex-jyrä

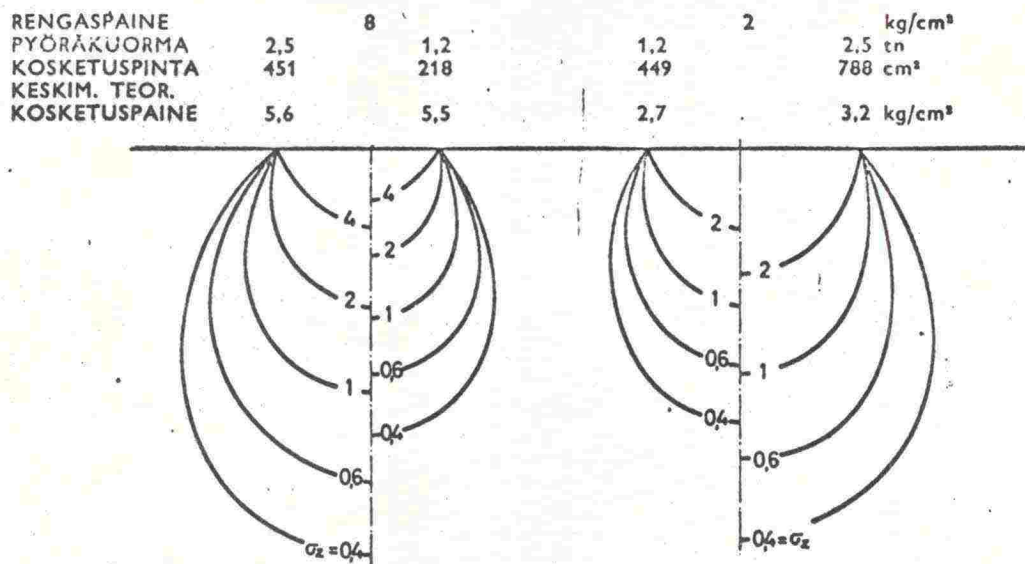


## 1.2 KUMIPYÖRÄJYRÄT

Kumipyöräjyrän tiivistysvaikutus syntyy jyrän staattisen pyöräpainon ja renkaan itsenäisen liikkeen vaikutuksesta. Rengas aikaansaa tiivistettävässä materiaalissa kosketuspinnasta pienimmän vastuksen suuntaan vaivaavan liikkeen, joka vastaa liikenteen vaikutusta. Kumipyöräjyrän tiivistysvaikutus riippuu oleellisesti seuraavista rakenteellisista tekijöistä:

- pyöräpaino
- renkaan ilmanpaine
- renkaan konstruktio
- pyörien oskillointi
- painon jakautuminen pyörille
- työnopeus

Pyöräkuorman ja rengaspaineen vaikutuksesta pystysuoran puristusjännityksen jakautumiseen esittää kuva 1.6.



Reifen 12.00-20 14PR

$\sigma_z$  = pystysuora puristusjännitys kg/cm<sup>2</sup>

Olosuhteet: Elastinen ja isotrooppinen alusta

Konsentraatiofaktori  $\gamma = 3$  F = ympyrä  $P_k$  = vakio alalla F

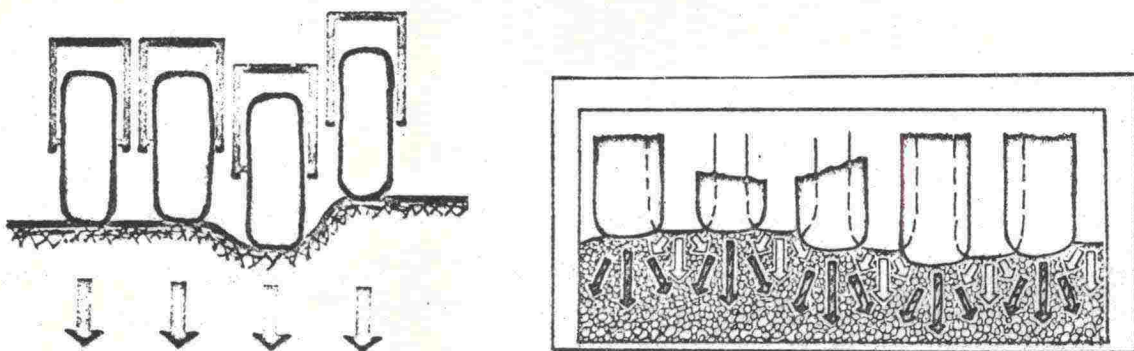
Kuva 1.6 Puristusjännityksen jakautumisen riippuvuus pyöräkuormasta ja rengaspaineesta

Kuvasta voidaan todeta, että pyöräkuormalla on vaikutusta syvyysuunnassa, kun taas rengaspaine vaikuttaa eniten pintakerroksien puristusjännityksiin. Päällysteijräyksessä on rengaspaineen säädöllä tärkeä merkitys, koska keskimääräistä pintapainetta voidaan nopeasti muuttaa rengaspainetta säätämällä.

Rengaskonstruktioita ovat valmistajat kehitelleet tiivistystyöhön sopivaksi. Ranskalainen Michelin on päätenyt teräskudoksiseen vyörenkaaseen, jolla saavutetaan seuraavat edut:

- pintapaine likimain vakio kosketusellipsin sisällä
- ilmanpaineen max. arvo  $10 \text{ kp/cm}^2$
- edullinen lämmönjakautuminen ja haihtuminen koko renkaasta. Lämmönkestävyys  $+160^\circ\text{C}$ .
- kulutuspinnaassa ei tapahdu muodonmuutoksia sen koskettaessa jyrättävää pintaa eikä renkaan eteen näin ollen muodostu massakasautumaa

Tasalaatuinen ja riittävä tiivistysaste voidaan saavuttaa vain silloin, kun jyrän paino jakaantuu tasan kaikille pyörille riippumatta jyräyksen alussa vallitsevista erilaisista kerrospaksuuksista ja pinnan epätasaisuuksista. Tämä edellyttää pyörien joustavaa kiinnitystä (oskillointia) ja tasaista pyöräkuormitusta (kuva 1.7).

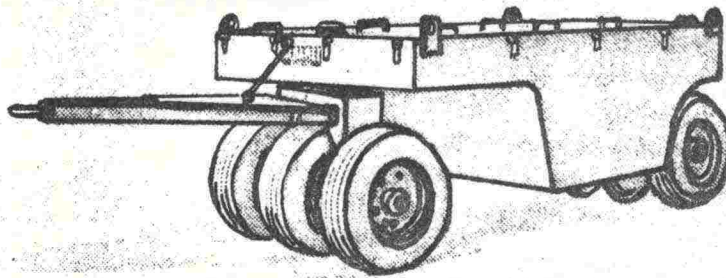


Kuva 1.7 Jyrän pyörien oskillointi ja tasainen pyöräkuormitus

Riittävän suuri työnopeus sekä nopea ja joustava suunnanvaihto aikaansaavat suuren pintakapasiteetin ja tätä kautta edulliset tiivistyskustannukset.

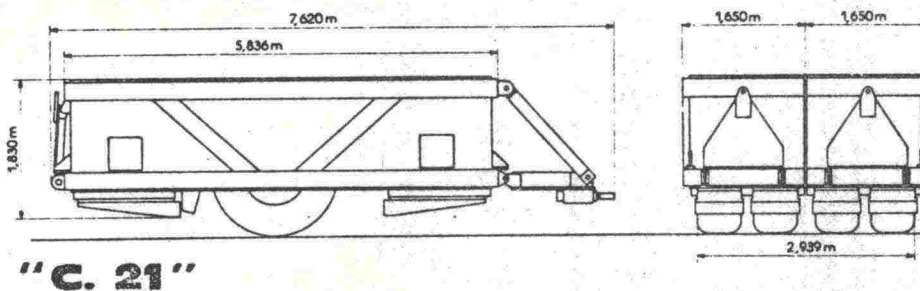
### 1.2.1 Vedettävät kumipyöräjyrät

Pienemmät vedettävät kumipyöräjyrät ovat kaksiakselisia ja kokonaispainoltaan noin 10 t luokkaa. Niiden etuakseli on ohjaava ja runko muodostaa lisäpainosäiliön. Kuvassa 1.8 on ranskalainen 11 t Albaret merkinen jyrä.



Kuva 1.8 Vedettävä kumipyöräjyrä

Suuremmat vedettävät kumipyöräjyrät ovat yksiakselisia ja niiden työpaino saattaa olla jopa 200 t. Kuvassa 1.9 on 100 t Albaret C-21 jyrä, jonka työleveys on 2,9 m ja lisäpaino säiliöiden tilavuus 25 m<sup>3</sup>. Rengaskoko on 21.00 x 25.



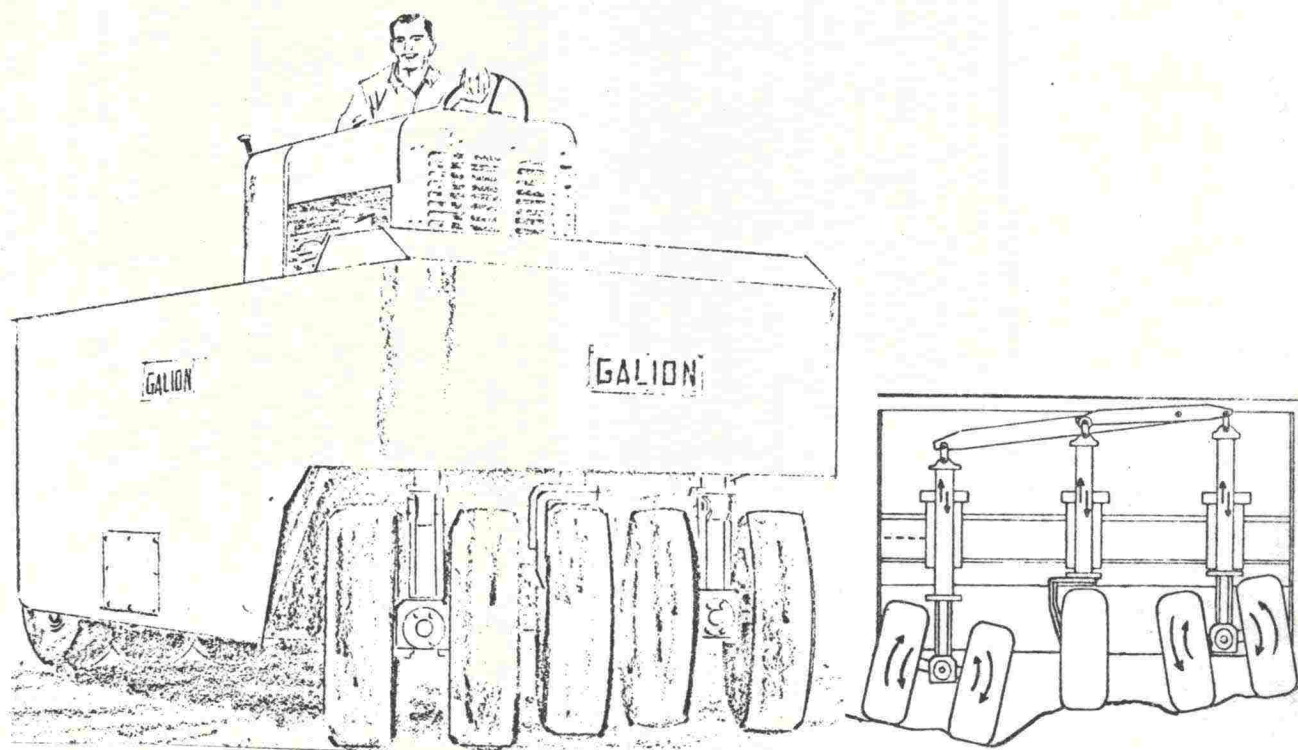
"C. 21"

Kuva 1.9 100 t Albaret C-21 jyrä



### 1.2.2 Itsekulkevat kumipyörä- jyrät

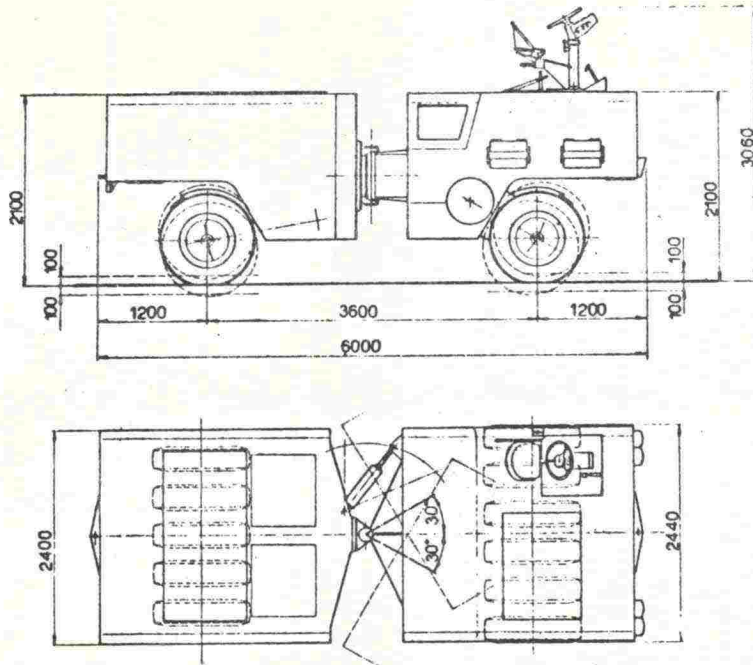
Kevyet kumipyöräjyrät, joiden kokonaispaino on 9-16 t, on tarkoitettu lähinnä päällysmateriaalien tiivistykseen. Rakenteeltaan niitä on lukuisia tyyppejä. Kuvassa 1.10 on esitetty pyöräohjattu Galionin 15 t jyrä, sen etupyörien ripustussysteemi ja ohjaavat etupyörät



Kuva 1.10 Pyöräohjattu Galionin jyrä, sen etupyörien ripustussysteemi ja ohjaavat etupyörät

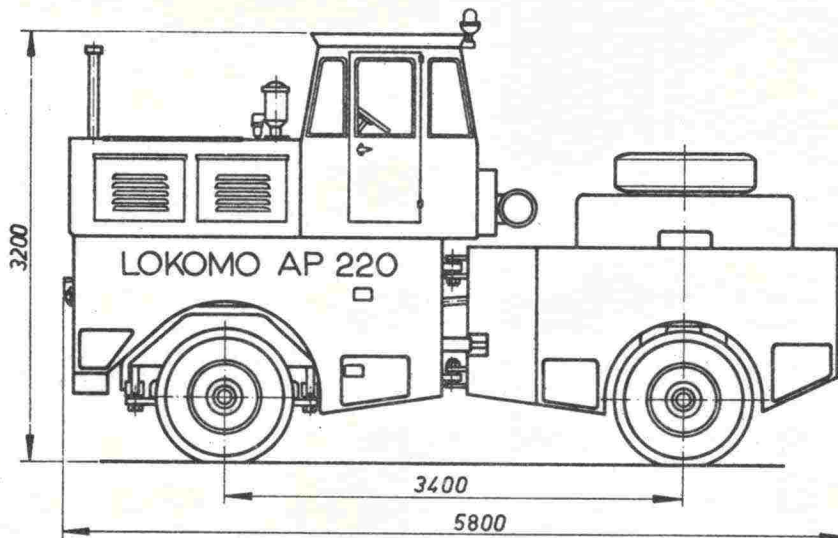
Toinen päätyyppi on ns. runko-ohjattu tyyppi, jota esittää kuva 1.11. Runko-ohjauksella saavutetaan se etu, että renkaiden peitto pysyy kaarteissakin vakiona ja maastokelpoisuus paranee.





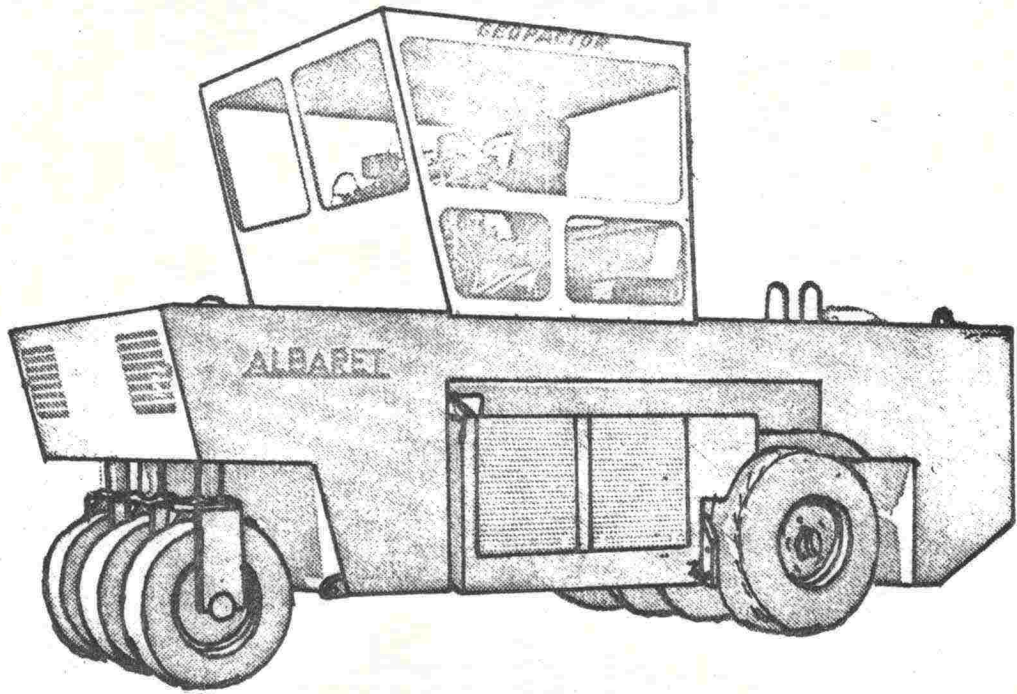
Kuva 1.11 Runko-ohjattu itsekulkeva jyrä

Raskaat kumipyöräjyrät on tarkoitettu sekä päällyste-  
että kerrosmateriaalien tiivistykseen. Niiden painot  
vaihtelevat 16-45 t ja pyöräluvut 7-13. Kuvassa 1.12  
on runko-ohjattu 28 t jyrä LOKOMO AP 220.



Kuva 1.12 LOKOMO AP 220

Suurimpia itsekulkevia kumipyöräjiä on kuvassa 1.13 esitetty ranskalainen 45 t jyvä Albaret Geopactor. Se on varustettu mm. kahdella moottorilla.

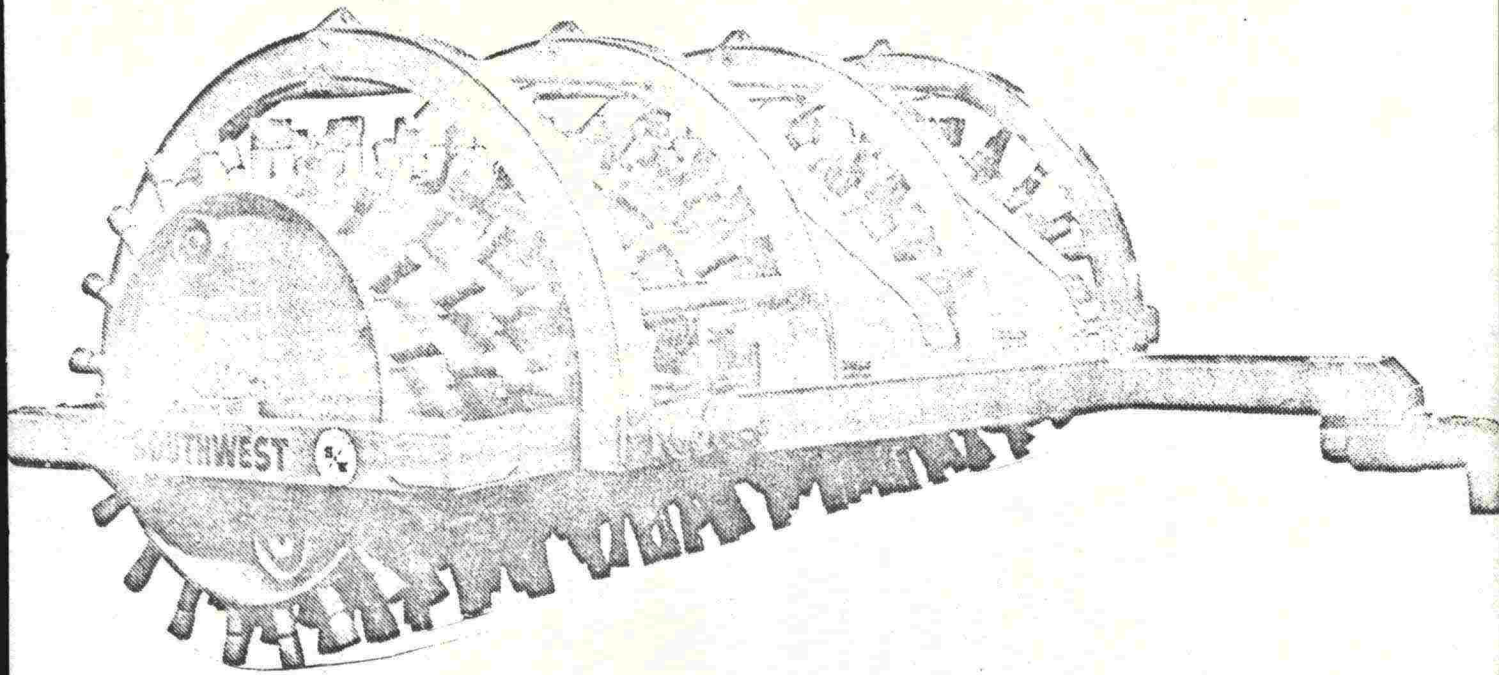


Kuva 1.13 Albaret Geopactor

### 1.3 ERIKOISJYRÄT

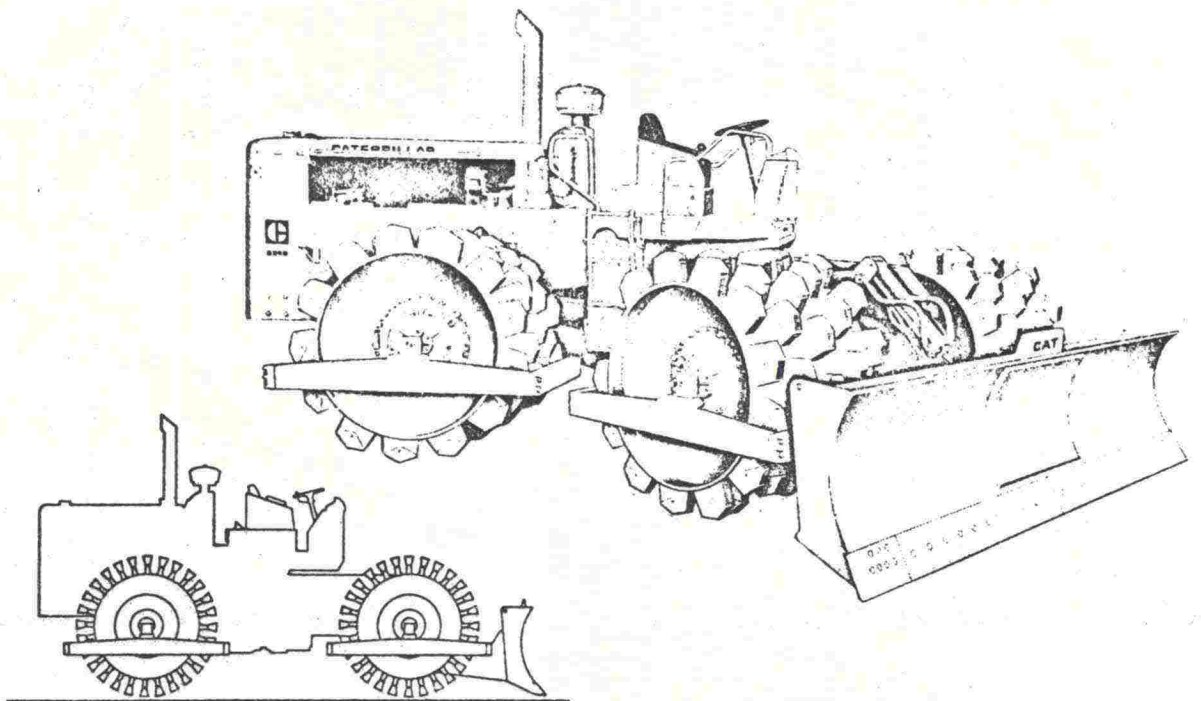
#### 1.3.1 S o r k k a j y r ä t

Näissä on valssin vaippaan kiinnitetty 60-120 kpl noin 20-25 cm pitkiä sorkkia, joiden muoto vaihtelee eri valmistajilla poikkipinnan ollessa pyöreä, suorakaiteen muotoinen tai yhdistelmä näistä. Sorkat aiheuttavat tiivistettävään materiaaliin pintapainekeskittymiä, jolla saattaa olla merkitystä syvyysvaikutukseen. Kosteissa materiaaleissa on haihtumispinta-alan suurentumisella myös merkitystä. Kuvassa 1.14 on n. 30 t hinattava sorkkajyvä Southwest 355-WS.



Kuva 1.14 Sorkkajyrä

Kuvassa 1.15 on esitetty erikoissovellutus sorkkajyrästä, jossa itsekulkeva jyrä on varustettu puskulevyllä. Valmistaja on Caterpillar.



Kuva 1.15 Itsekulkeva sorkkajyrä varustettuna pusku-levyllä



Staattisten jyrien erikoismuotoja ovat edelleen kalterijyrät ja eräät muut rakenteet, jotka kohottavat sorkkajyrien tavoin yksityisten kohtien painetta aiheuttaen päällimmäisen kerroksen muovautumista tai murskautumista.

## 2. DYNAAMISESTI VAIKUTTAVAT TIIVISTYSLAITTEET

Tärykoneiden tiivistysvaikutus perustuu siihen, että maahan johdetaan värähtelyenergiaa, joka pienentää maahiukkasten välistä kitkaa. Tällöin hiukkaset tärykoneen aikaansaaman paineen tai junttavaikutuksen johdosta asettuvat tiiviimmin toisiaan vasten ja huokostilavuus pienenee.

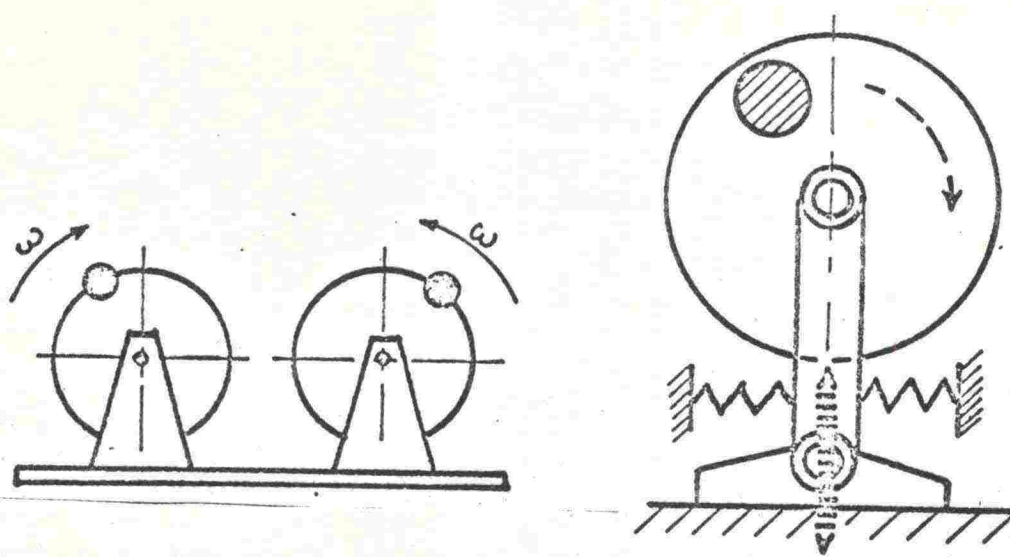
Värähdysten synnyttämiseen käytetään tärykoneissa joko pyöriviä epäkeskomassoja tai oskilloivaa massaa. Täryelimen liike voi olla joko kehäliike tai suunnattu liike (kuva 2.1).



Kuva 2.1 Täryelinten liike

Suunnattu liike voi olla pystysuora tai säädetty siten, että täryliikkeen vaakasuora komponentti aikaansaa koneen liikkumisen. Suunnattu täryliike syntyy vastakkain pyörivien epäkeskojen vaikutuksesta (kuva 2.2) tai oskilloivan massan liikkeestä.





Kuva 2.2 Täräilyliikkeen syntytytavat

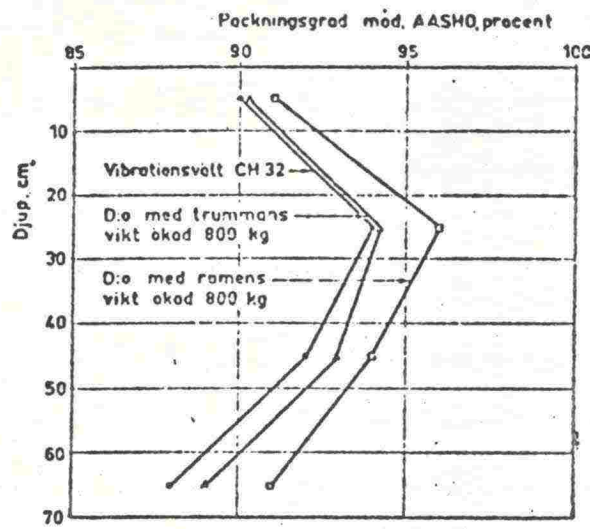
Täräilyjyrästä maahan tapahtuvan energian siirtotavan perusteella erotetaan kaksi eri tyyppiä: "Iskutäräilyjyrät", joiden täräilyelimen synnyttämä voima on suurempi kuin valssin paino. Tällöin keskipakovoiman suuntautuessa ylöspäin irtautuu valssi maasta, jolloin koneen ja maan välinen yhteys hetkellisesti katkeaa. Koneen palautuessa takaisin maahan aiheuttaa vapautuva liike-energia voimakkaan iskun maaperään. Tällöin puhutaan niin sanotusta "junttavaikutuksesta".

"Maassa pysyvä" täräilyjyrätyyppi on siinä tapauksessa, että keskipakovoima on pienempi kuin valssin paino. Erikoisesti silloin tämä on tärkeää, kun täräilyvalssi toimii myös vetävänä valssina, toisin sanoen jyrä on itsekulkeva.

Täräilykoneiden tiivistystulokseen vaikuttavat ainakin seuraavat koneteknilliset ominaisuudet:

- koneen paino
- värähtelyelimen ja muun osan painojen suhde
- keskipakovoima ja amplitudi
- frekvenssi
- ajonopeus ja ylityskertojen lukumäärä

Saavutettu tiiviysaste kasvaa jyrän painon mukaan, mutta ei niin voimakkaasti kuin paino. Jyriä ei voida vertailla suoraan painon perusteella, koska eri tekijöiden yhteisvaikutus määrää tiivistystuloksen. Värähtelevän massan ja rungon massan suhteella on vaikutusta tiivistystulokseen. Tämä voidaan todeta Forsbladin tutkimuksesta kuvassa 2.3.



Kuva 2.3 Jyrän värähtelevän massan ja rungon massan suhteen vaikutus tiivistystulokseen

Värähtelyjen amplitudi on erittäin merkittävä seikka tiivistystuloksen kannalta. Mitä suuremmaksi amplitudi saadaan, sitä suurempi on myös tehonsiirtokerroin värähtelijän ja maan välillä.

Täryjaksoluvun sovittaminen maa-tärylaitesysteemin resonanssijaksoluvulle on kysymys, joka on ollut suuren mielenkiinnon kohteena. Muutamat tutkijat ovat sitä mieltä, että täryttämällä suoritettavan maan tiivistyksen tulisi tapahtua mainitulla ominaisjaksoluvulla. Laboratoriokokeilla on voitu osoittaa resonanssin merkitys, mutta käytännön olosuhteissa saavutettuja tuloksia ei esitetty.

Jotta tärykonetta voitaisiin käyttää mahdollisimman tehokkaasti hyväksi, tulisi jyrässä olla säätömahdollisuus, jolla kaikkia ominaisuuksia voitaisiin muuttaa toisistaan riippumatta, jolloin aina löydetäisiin kullekin maatyypille paras yhdistelmä. Tähän on käytännössä kuitenkin vaikeaa päästä, koska kustannus ym. tekijät asettavat omat rajoituksensa jyrrien rakenteelle. Seuraavassa tarkastellaan erilaisia käytössä olevia säätötapoja ja mahdollisuuksia.

Luther on tutkimuksissa todennut, että täryjyrien kehittämä tiivistysteho kasvaa tulon

$$V = G_0 \cdot A_0 \cdot f$$

mukana, missä  $G_0$  on täryelimen paino,  $A_0$  sen amplitudi ja  $f$  täryjaksoluku. Tiivistysteho riippuu siis valssin painosta, värähdysamplitudista ja värähdysjaksoluvusta. Painon muuttaminen on hankalaa ja hidasta, siksi tavallisimmat käytössä olevat säätötavat kohdistuvatkin amplitudin ja frekvenssin muuttamiseen. Tällöin keskipakoiskäyttöisillä laitteilla tullaan keskipakovoiman säätöön. Keskipakovoima noudattaa yhtälöä

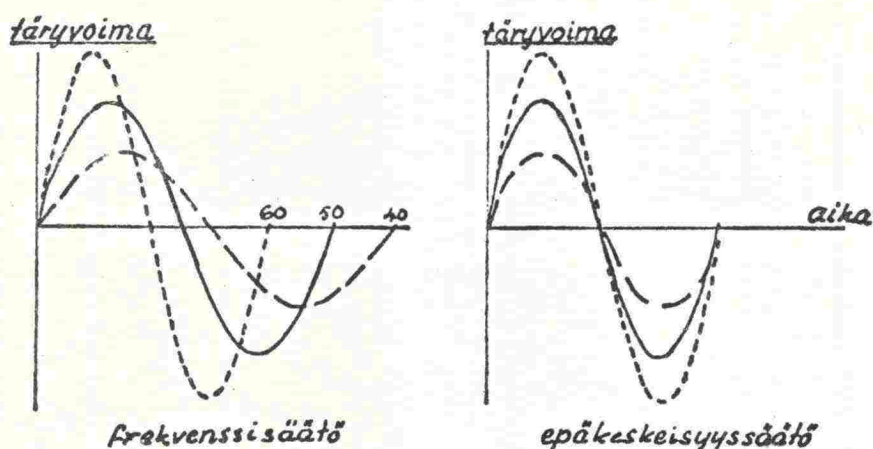
$$C = m \cdot r \cdot \omega^2$$

missä  $m$  on epäkeskon massa,  $r$  sen epäkeskeisyys ja  $\omega$  kulmanopeus, jolla massa pyörii. Keskipakovoiman suuruutta voidaan säätää seuraavilla eri tavoilla:

- säätö epäkeskomassaa muuttamalla
- säätö epäkeskeisyyttä muuttamalla
- säätö kierroslukua muuttamalla

Täryjyryissä käytetään kahta viimeksimainittua. Kuva 2.4 esittää näiden säätöjen vaikutuksen.





Kuva 2.4 Frekvenssi- ja epäkeskeisyysäädön vaikutus täryvoimaan

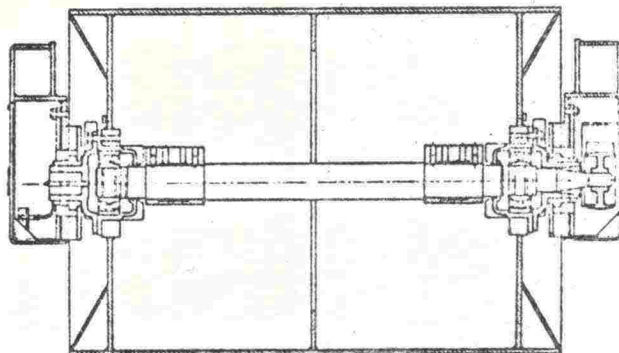
Dynaamisesti vaikuttavia tiivistuskoneita on useita tyyppejä, joista seuraavassa esitellään yleisimmät.

## 2.1 VEDETTÄVÄT TÄRYJYRÄT

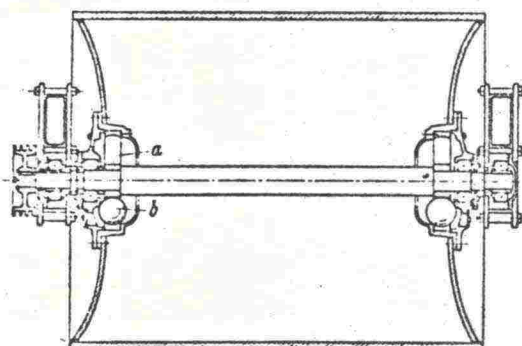
Näissä jyrissä on valssiin joustavasti kiinnitetty runko, johon kiinnittyy voimanlähteenä oleva moottori. Tärykoneistoa käytetään yleensä kiilahihnojen tai nivelakselin välityksellä. Valssiin sijoitetun tärykoneiston yleisintä konstruktiota esittää kuva 2.5. Tässä rakenteessa epäkeskot on kiinnitetty valssiin laakeroituun akseliin. Kuvassa 2.6 on Vibro-Verken'in käyttämä rakenne, jossa akseli pyörittää teräskuulia ja siten aikaansaa epäkeskovoiman.

Vedettävien täryjyrien painot vaihtelevat 1,5 - 6 t ja suurimpien epäkeskovoimat ovat yli 30 t. Kuvassa 2.7 on esimerkki kevyestä jyrästä, jonka paino on 3,5 t ja jyräysleveys 1,4 m.

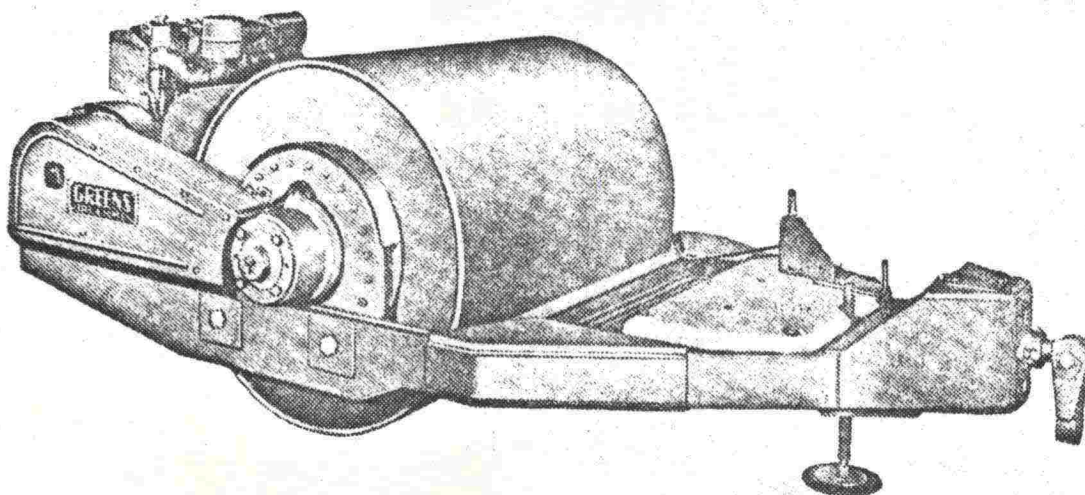




Kuva 2.5 Tärkoneisto sijoitettuna valssiin

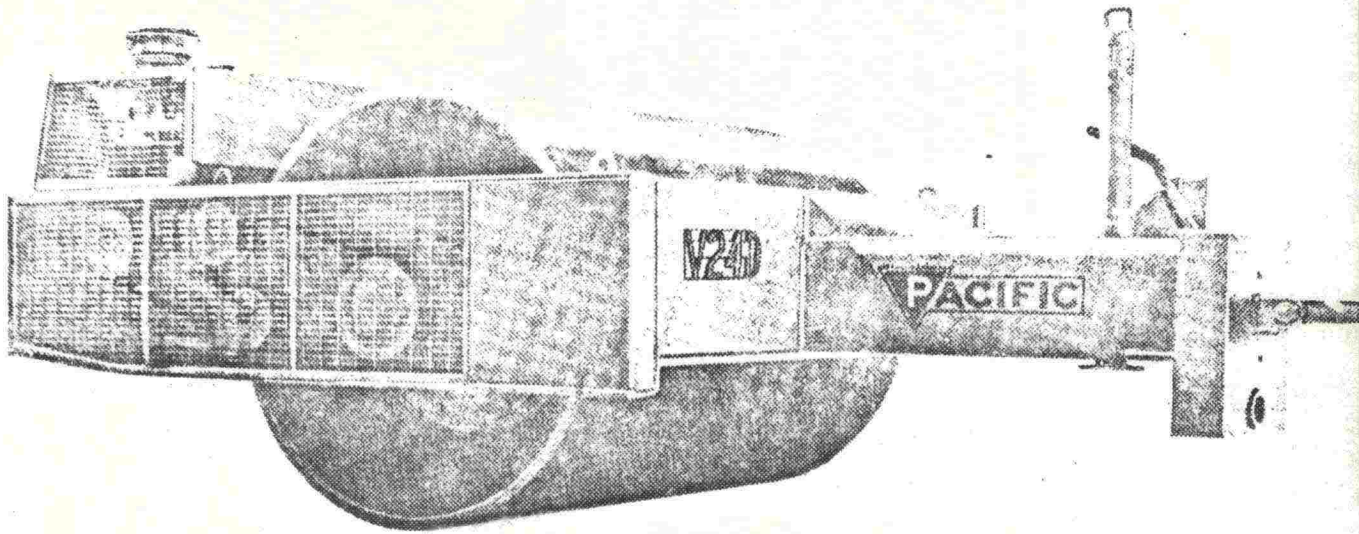


Kuva 2.6 Vibro-Verken'in käyttämä tärkoneisto



Kuva 2.7 Kevyt vedettävä tärkyjyvä

Kuvassa 2.8 on raskas täryjyrä, jonka paino on 11 t ja epäkeskovoima 27,2 t. Työleveys on 2,1 m ja tärytaajuus 1450 1/min.



Kuva 2.8 Raskas vedettävä täryjyrä

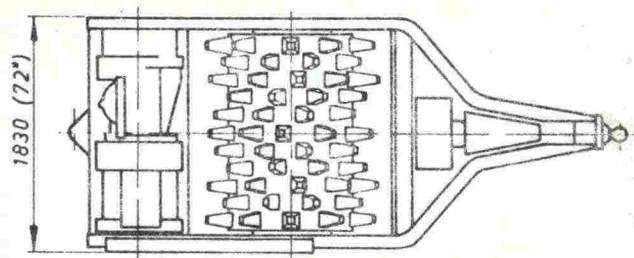
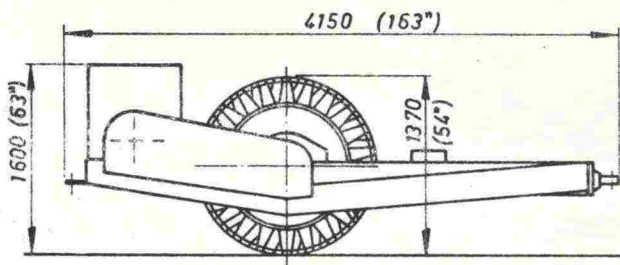
Vedettävien täryjyrien etuina voidaan mainita:

- suuri iskuvoima
- suuri amplitudi - hyvä syvyysvaikutus
- kohtuulliset käyttökustannukset

## 2.2 TÄRYSORKKAJYRÄT

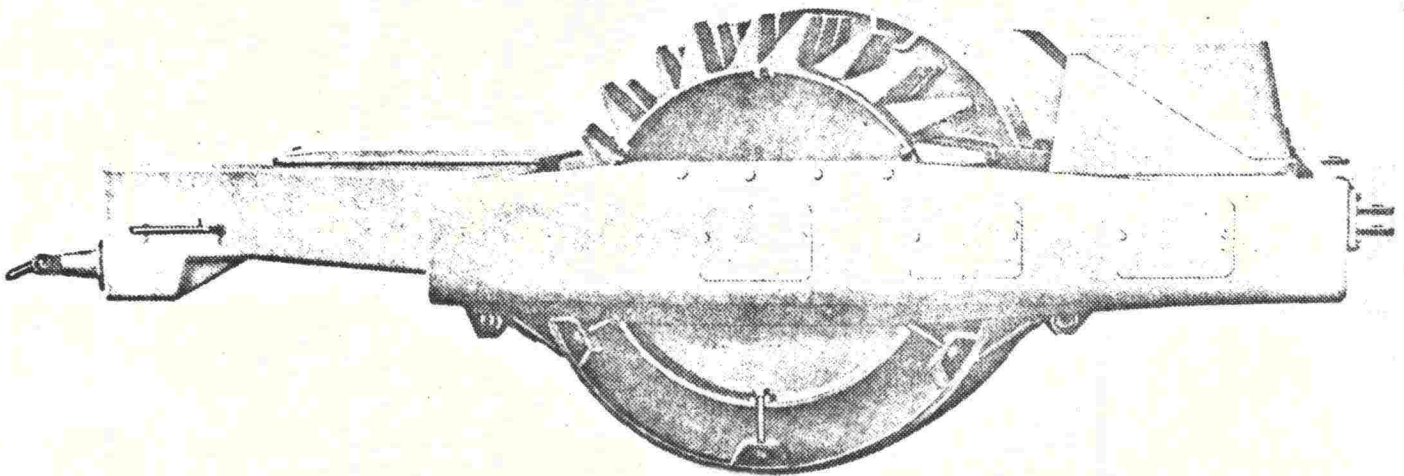
Periaatteeltaan nämä ovat täryjyrien kaltaisia, mutta niissä on valssin vaipan pintaan kiinnitetty sorkkia. Sorkkien lukumäärä on yleensä 80-130 kpl ja niiden pituus n. 230 mm. Kuvassa 2.9 on 4,5 t tärysorkkajyrä LOKOMO ATS 38.

Kuvassa 2.10 on Zettelmeyerin tärysorkkajyrä, jossa sorkkien päälle voidaan kiinnittää vaippalevyt, jolloin jyrä muuttuu normaaliksi täryjyräksi.



ATS 38

Kuva 2.9 Tärysorkkajyrä



Kuva 2.10 Tärysorkkajyrä, joka voidaan muuntaa tavalliseksi täryjyräksi

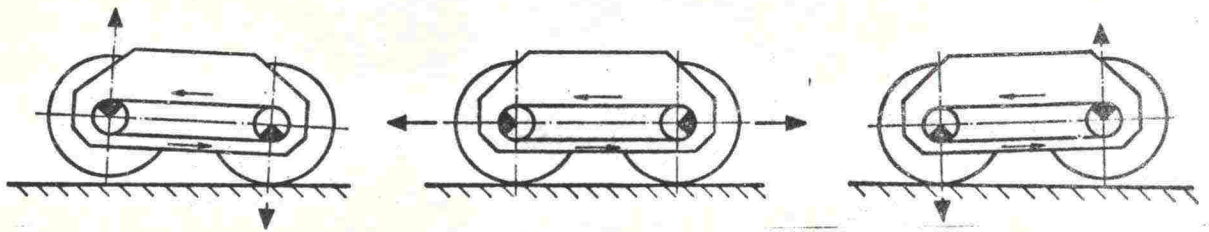
### 2.3 ITSEKULKEVAT TÄRYJYRÄT

Näissä jyrissä on joko valssiin yhdistetty myös kulku-liike tai valssi on yhdistetty vetonuppiin. Rakenteen perusteella voidaan erottaa kolme ryhmää:



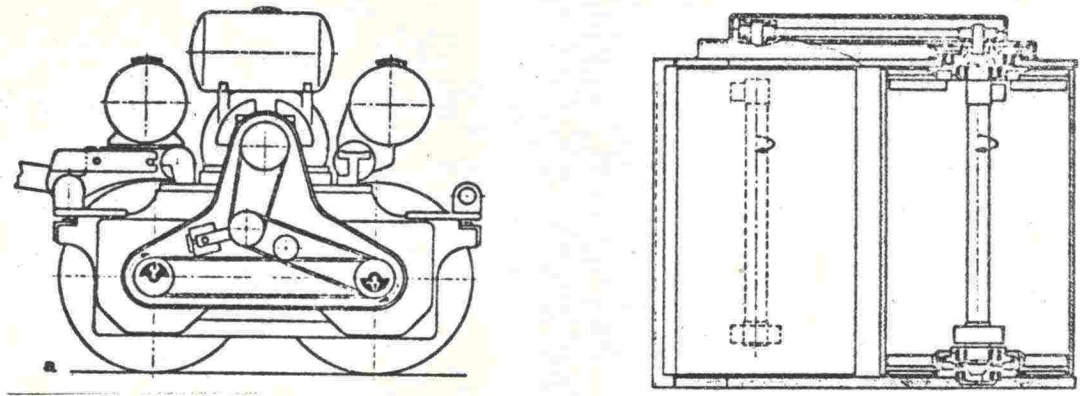
### 2.3.1 Kaksoistäryvalssiyrät

Kaksoistäryvalssiyrät ovat yleensä kevyitä ja niissä kuljettaja kävelee jyrän perässä säädellen jyrän liikkeitä ohjaussauvasta. Kaksoistärytyksen periaate ilmenee kuvasta 2.11.



Kuva 2.11 Kaksoistärytyksen periaate

Rakenne on esitetty kuvassa 2.12. Molemmilla valsseilla on sekä täry- että kulkuliike.



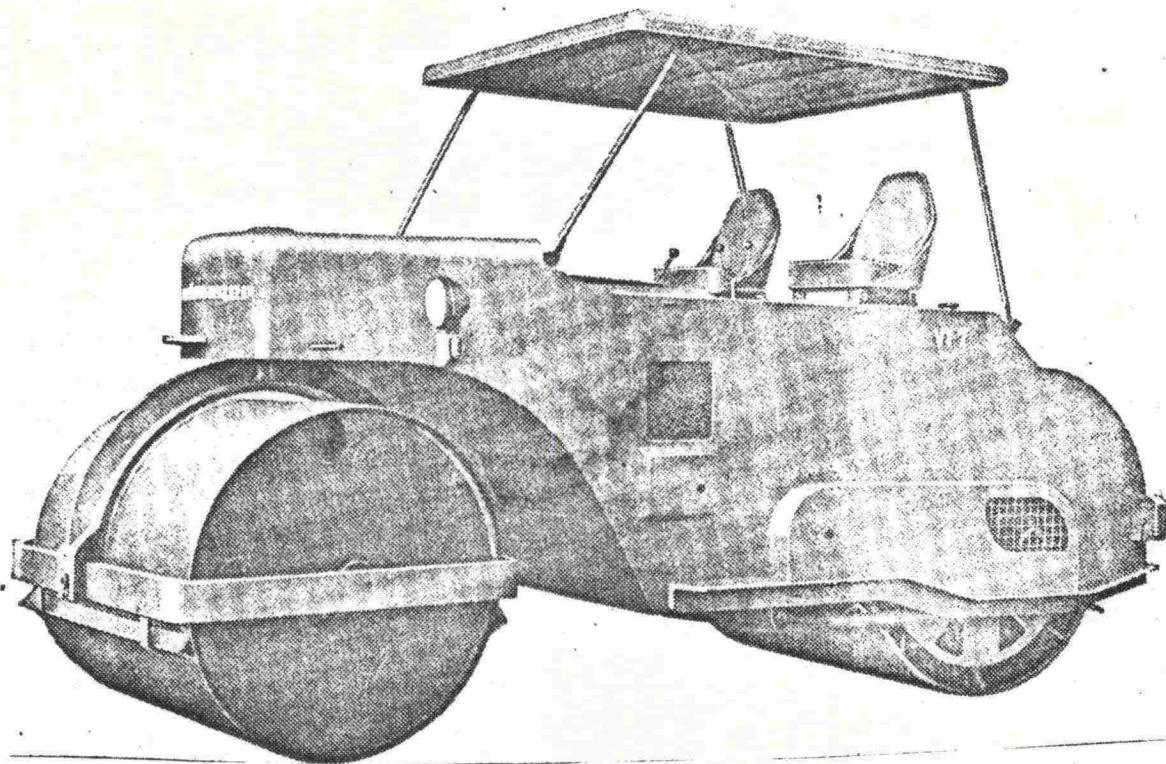
Kuva 2.12 Kaksoistäryvalssiyrän rakenne

Suurimmat kaksoistäryvalssiyrät painavat n. 8 t ja iskuvoimat ovat 2 x 16 t luokkaa.



### 2.3.2 Tandemjyrät

Tandemjyrissä on kaksi peräkkäistä valssia, jotka voivat olla sekä vetäviä että täryttäviä. Kuljettajalle on jyrässä ohjaamo, josta hän voi hallita jyrän liikkeitä. Tandemjyrien painot vaihtelevat 1,5 - 15 t. Kuvassa 2.13 on tyypillinen tandemjyrä, jossa etuvalssi on ohjaava ja takavalssi täryttävä ja vetävä.



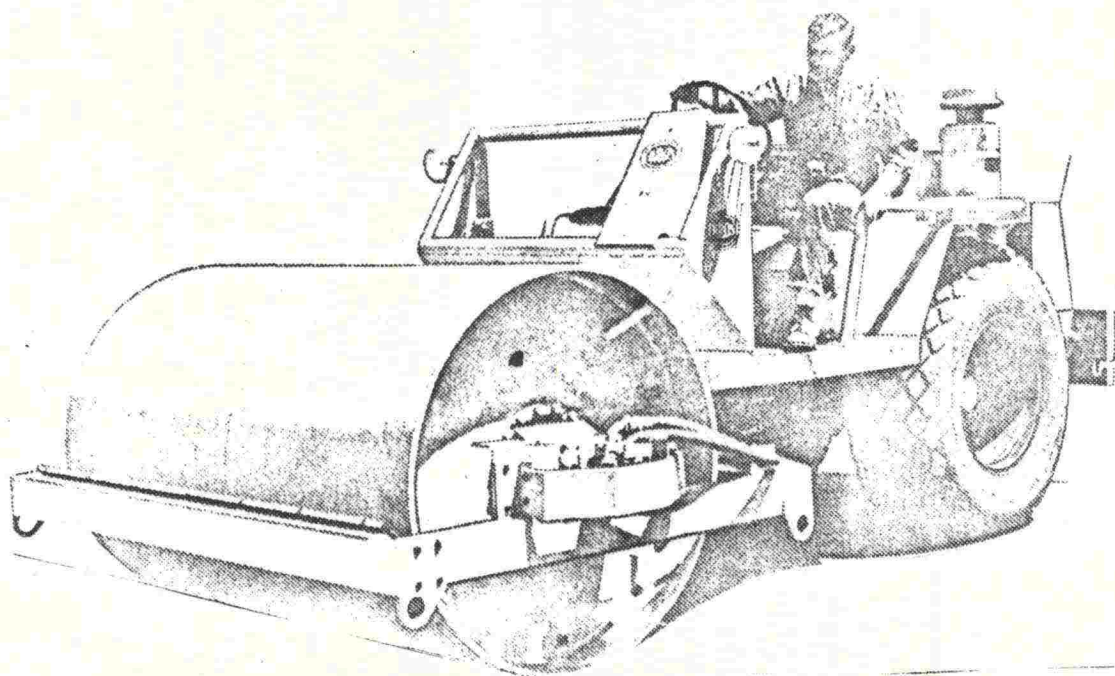
Kuva 2.13 Tandem-jyrä

Tandemjyrissä iskuvoima ja amplitudi on yleensä paljon pienempi kuin samanpainoisissa vedettävissä täryjyrissä, joten niiden syvyysvaikutus on pienempi. Niiden käyttö onkin keskittynyt lähinnä päällysteiden jyräykseen.

### 2.33 Vetopäällä varustetut täryjyrät

Vetopäällä varustetuissa täryjyrissä on veto-osassa isot ilmakumirenkaat. Moottori, voimansiirtolaitteet

ja ohjaamo on myös sijoitettu tähän osaan. Yleisin ohjaustapa on runko-ohjaus, mutta markkinoilla on myös pyöräohjattuja malleja. Näiden jyrrien painot vaihtelevat 6-15 t ja suurimpien iskuvoimat ovat n. 20 t luokkaa. Jyräysleveyydet ovat 1,8 - 2,6 m luokkaa ja tiivistysteholtaan suurimmat vastaavat n. 8 - 10 t vedettäviä tärjyriä. Kuvassa 2.14 on Bros'in 6,3 t jyrä, jossa sekä tärjy- että ajovoimansiirto on hydrostaattinen.



2.14 Vetopäällä varustettu tärjyjrä

Näiden jyrrien etuina voidaan mainita:

- ketterä liikkumaan
- helppo ajaa myös takaperin, jolloin ahtaissakin paikoissa saavutetaan suuri pintakapasiteetti

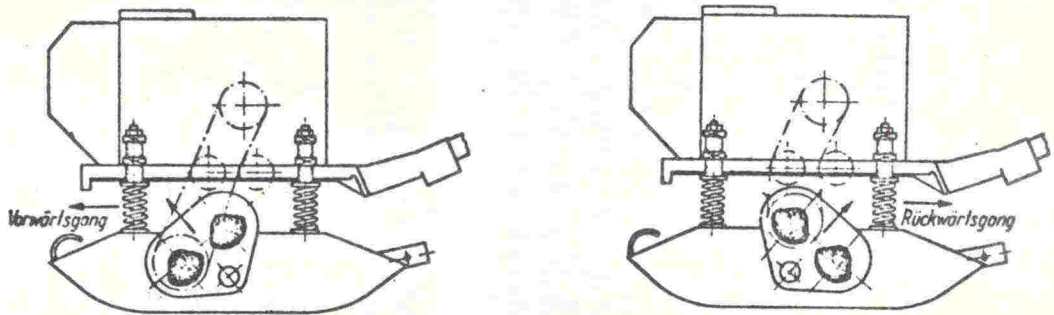
Haittoina voidaan mainita:

- hankintahintaan nähden pieni tiivistysteho
- saattaa esiintyä liikkumisvaikeuksia vaikeissa olosuhteissa



## 2.4 TÄRYKELKAT

Tärykelkoissa on pohjalevy varustettu tärykoneistolla. Levyyn on joustavasti kiinnitetty käyttömoottori ja ohjausvarsi. Kuvassa 2.15 on tärykelkan rakenneperiaate, jossa kulkuliike aikaansaadaan tärykoneistoa kääntämällä.



Kuva 2.15 Tärykelkan rakenneperiaate

Tärykelkkoja valmistetaan 0,1 - 2 t painoisia ja niiden käyttö rajoittuu yleensä pienempiin työkohteisiin.

## 2.5 ERIKOISTÄRYTTIMET

Tähän ryhmään kuuluu joukko erikoislaitteita, joiden käyttö on hyvin vähäistä tienrakennuksessa. Esimerkkinä voidaan mainita:

- juntat
- pudostuslevyt
- räjähdysjuntat
- hyppytäryttäjät

## TULEVAISUUDEN NÄKYMÄÄ

Valmistajat eri puolilla maailmaa työskentelevät tarkokkaasti kehittääkseen entistä tehokkaampia ja taloudellisempia tiivistyskoneita. Suurempien yksiköiden markkinoille tulo jatkunee lähitulevaisuudessakin. Mitään mullistavia periaateratkaisuja ei ole näköpiirissä. Täryjyrien kohdalta voidaan todeta, että automaattinen jyrä - maa - systeemin ominaisvärähdysluvun seuranta saattaisi tuoda lisää tehoa tärytiivistykseen. Itsekulkevia täryjyriä tultaneen laajemmalti käyttämään, kun ne saadaan taloudellisemmiksi.

Tärkeimpiä tekijöitä kehityksessä ovat käyttäjiltä saadut tiedot ja kehittyvien rakennusmenetelmien asettamat vaatimukset.

## KIRJALLISUUTTA

Forssblad, L.: Jordvibrerings undersökningar, Bok- och Reklamtryck AB, Stockholm 1963

Härkönen, P.: Maantiivistyksen tärykoneista ja niiden valinnasta, Maanrakennus ja kuljetus n:o 6/1963, eripainos

Lorenz, H.: Grundbau-Dynamik, Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1960

Luther, G.: Die Wirkungsweise und kennzeichnenden Merkmale von Vibrationswalzen, Strasse und Autobahn 18 (1967) Heft 3

Theiner, J.: Der maschinelle Aufbau von Vibrationswalzen und Plattenrüttlern, Der Bauingenieur 41 (1966) Heft 4



Weber, G.: Untersuchung über Vorgänge bei der statischen und dynamischen Verdichtung des Bodens, vältöskirja.

Vanh. ins. M. Annila

IV MITEN TIIVISTETÄÄN

## IV MITEN TIIVISTETÄÄN

### 1. TIEN ERI RAKENNEOSIEN TIIVISTYKSESSÄ ESIINTULEVIA KYSYMYKSIÄ

#### JOHDANTO

Edellä olen esitelmässäni tiivistyskaluston valintaan ja käyttöön liittyvistä kysymyksistä käsitellyt yleensä maarakennuksessa esiintulevia tiivistämiskysymyksiä. Nämä kysymykset tulevat esiin tien eri rakenneosien tiivistämisessä. Eri osia rakennettaessa tulevat kuitenkin korostetusti esille eräät määrätyt asiat. Siksi on paikallaan, että käsitellään erikseen eri rakenneosien tiivistämisessä erityisesti huomioonotettavia asioita.

#### 1.1 PERUSMAAN TASAAMINEN JA TIIVISTÄMINEN

Tienrakennustöiden yleisen työselityksen mukaan on päällysrakenneluokissa 1 - 4 raivauksen yhteydessä perusmaassa olevat ojat, painanteet ja kivien ja kantojen raivauksessa syntyneet kuopat täytettävä samanlaisella maalla ja tiivistettävä vaadittuun tiiviyyteen. Tämä on erikoisen tärkeätä ns. 0-tasauksessa ja matalien penkeiden kohdalla. On todettu, että routavaurioita esiin-



tyy ennenkaikkea tällaisilla kohdilla. Tämä johtuu mm. siitä, että vesien poisjohtaminen perusmaan päältä ei ole tarpeeksi tehokas, sekä siitä, että perusmaan laatu on jäänyt epätasaiseksi.

Jos routivassa perusmaassa olevia kuoppia täytetään karkeammalla maalla, routii tällainen kohta toisin kuin ympäristönsä. Karkeampi maa routii tässä tapauksessa vähemmän, mutta toisaalta karkealla maalla täytetty kuoppa kerää vettä. Näin ollen perusmaan vesipitoisuus vaihtelee, mistä johtuu epätasaista routimismisnousua. Perusmaassa oleva kuoppa on siis täytettävä samantyyppisellä maalla kuin sen ympäristö on. Se on myös tiivistettävä niin, ettei painauma myöhemmin synny. Tiiväyserotkin aiheuttavat eroja routimisessa.

Työselityksen mukaan on siirtymäkiilasyvyyden yläpuolella oleva kuoppa viistettävä kaltevuuteen 1:10 ja siirtymäkiilasyvyyden alapuolella 6 metrin syvyyteen saakka kaltevuuteen 1:4. Lisäksi on mainittava, että raivaus on suoritettava niin huolellisesti, ettei tien alle jää paksuudeltaan ja laadultaan epämääräisiä kerroksia raivausjätteitä yms., vaan että alusrakenteen yläpinta on laadultaan ja tiiviydeltään tasainen.

Tiivistäminen raivaustyön yhteydessä lienee yleensä parasta tehdä sillä koneella, joka raivaustyönkin tekee. Kysymyksessä ovat yleensä niin ohuet kerrokset, että tiivistäminen esim. puskukoneella onnistuu.

Raivaustyön suorittamiselle varsinkin tiivistettävissä kohdissa on valittava sään puolesta sopiva aika. Vesien poisjohtaminen on usein vaikeata ja sateet muuttavat tilanteen helposti sellaiseksi, että tiivistäminen on täysin mahdotonta. Jos työtä yritetään tällaisissa olosuhteissa väkisin tehdä, on seurauksena vain maan vettyminen eikä työtä saada tehdyksi loppuun ennen kuin maa on kuivunut. Näin käy hienorakeisilla mailla. Karkearakeisilla mailla ei liika vesi yleensä tiivistästyötä estä.

## 1.2 TIIVISTÄMINEN SEMENTTI- TAI KALKKISTABILOINNIN YHTEYDESSÄ

Sementti- ja kalkkistabiloinnilla saavutettava lujuus ja tämän lujuuden säilyminen riippuvat aivan ratkaisevasti siitä, millaiseen tiiviyteen stabiloitava maa onnistutaan tiivistämään. Ellei tiivistäminen onnistu, on stabiloinnilla saatu hyöty usein kyseenalainen.

Tiivistäminen saattaa kuitenkin olla vaikeata. Stabiloointia on meillä yleensä totuttu tekemään silloin, kun maan laatu on heikko ja olosuhteet maan vesipitoisuuden puolesta vaikeat. Tällainen pohjamaa ei ehkä kestä jyräystä niin paljon, että saavutettaisiin riittävä tiiveys. Yleensä olisi pyrittävä siihen, että stabiloinnilla varmistettaisiin rakenteen säilyvyys. Kuivatuksesta olisi huolehdittava niin, ettei vesipitoisuus olisi työn aikanakaan liian korkea.

## 1.3 RUMPUTYÖT JA SILTOJEN TAUSTOJEN TÄYTÖT

Käytettävä materiaali on karkearakeista, joten tiivistäminen vaadittuun tiiviyteen yleensä onnistuu suhteellisen pienellä työmäärällä. Vaikeuksia saattaa aiheuttaa materiaalin tasarakeisuus, jonka takia tiivistyvyys on heikko. Myös arinasoran tiivistäminen voi aiheuttaa vaikeuksia, jos perusmaa on laadultaan sellainen, ettei se kestä voimakasta tiivistystyötä. Tällöin voidaan työselityksen mukaan tyytyä siihen, että arinasora tiivistetään huolellisesti 30 cm:n paksuina kerroksina mutta ainoastaan ylimmässä kerroksessa vaaditaan 90 %:n tiiviys.



#### 1.4 MAAPENKEREET

Maapenkereiden tiivistämisessä tulee esiin monia asioita, joista työn onnistuminen riippuu. Maalaji on usein hienorakeista niin, että tiivistäminen onnistuu vain määrättyissä olosuhteissa. Kuten aikaisemmin on mainittu, vaatii hienorakeinen maa yleensä suuremman työmäärän kuin karkearakeinen, jotta maa tiivistyisi määrättyyn proctor-tiiveyteen. Jos vesipitoisuus on liian korkea, voi tiivistäminen olla mahdotonta.

Ennen pengerrystyön aloitusta on tarpeen selvittää maan luonnollinen vesipitoisuus, optimivesipitoisuus sekä se, mitä näiden vesipitoisuuksien ero vaikuttaa tiivistämistyöhön. Tällöin voidaan todeta esimerkiksi, että luonnollinen vesipitoisuus on jo niin korkea, että vähäinenkin veden lisäys tekee tiivistystyön mahdottomaksi. Tämä on otettava työn ajoituksessa huomioon. Sateisella säällä ei tällaista työtä voi lainkaan tehdä.

Maapengertä rakennettaessa olisi hyvä, jos maat heti levitettäisiin ja tiivistettäisiin ja penkereen harja muotoiltaisiin oikeaan muotoonsa. Tällöin vältetään se vahinko, jonka sade voi aiheuttaa. Jos penkereellä on tasaamattomia ja tiivistämättömiä maita, ne vettyvät ja töiden jatkaminen vaikeutuu. Myös työn tulos voi pysyvästi jäädä heikoksi.

Täällä käsitellään erikseen talvitiivistämistä, joten siihen ei tässä yhteydessä lähemmin puututa. Mainitsen vain siitä, että penkereisiin jääneet lumi ja jää saattavat jo pieninäkin määrinä aiheuttaa sen, että tiiviys jää alle vaadittujen arvojen eikä sitä enää myöhemminkään saada vaatimuksia vastaavaksi.



### 1.5 LOUHOSPENKEREET

Tämä esitys käsittelee lähinnä maiden tiivistämistä. Täydellisyyden vuoksi mainitsen kuitenkin myös louhospenkereet. On tärkeätä, että niitä rakennettaessa noudatetaan tiiviyydestä annettuja määräyksiä. Jos pengeri jää harvaksi, valuu kantavan kerroksen materiaali louhoksen sekaan. Tämä on virhe, joka voidaan korjata vain suurin kustannuksin. Louhospenger on rakennettava joko kokonaan tiiviinä tai yläpinta on huolellisesti tiivistettävä pienellä louheella tai sepeillä.

### 1.6 TIEN SITOMATTOMAT KERROKSET

Tien sitomattomien kerrosten materiaalien tiivistykseen sopivat hyvin sekä täryjyrät että kumipyöräjyrät. Tiivistäminen onnistuu yleensä suhteellisen pienellä työmäärällä. Rakeisuuskäyrän muoto, vesipitoisuus ja kerralla tiivistettävän kerroksen paksuus saattavat kuitenkin aiheuttaa vaikeuksia.

Jos materiaali on tasarakeista, on sen tiivistäminen proctor-kokeen perusteella määrättyyn tiiviysarvoon vaikeata. Tämä vaikeus esiintyy hyvin usein eristyskerroksen ja toisinaan myös jakavan kerroksen tiivistyksessä. Jos noudatetaan rakeisuuskäyrän muodosta annettuja ohjeita, on materiaali suhteellisen hyvin tiivistyvää. Rakeisuuskäyrää joudutaan toisinaan parantamaan lisäämällä hienoa kiviainesta.

Vesipitoisuus on sitomattomien kerrosten tiivistyksen aikana yleensä paljon alle optimin. Tällöin on selvítettävä, mitä tämä ero merkitsee, kannattaako kastella ja miten paljon.

Kerralla tiivistettävien kerrosten paksuudet ovat eristyskerroksen ja jakavan kerroksen tiivistyksessä yleensä suuremmat kuin tiivistämistyön kannalta olisi järkevää. Nämä kerrokset rakennetaan yleensä talvella ja tiivistäminen jää ainakin pääosiltaan kesäkauteen. Kerrospaksuus on niin suuri, ettei jyrän syvyysvaikutus enää ole riittävä. Eristyskerroksen tiivistämistä vaikeuttavat tällöin yleensä myös tasarakeisuus ja alhainen vesipitoisuus. Vesipitoisuuden parantaminen on vaikeata, usein käytännössä mahdotonta. Paras syvyysvaikutus saavutetaan meillä nyt käytössä olevasta kalustosta raskaalla täryjyrällä.

Kerrosten tiivistämisessä on syytä tarkasti harkita, mikä tulos tiivistyksellä saavutetaan. On jyrättävä tarpeeksi, mutta ei liikaa. Tarpeetontakin jyräystä esiintyy.

## 2. TIIVISTYSKALUSTON VALINTAAN JA KÄYTTÖÖN LIITTYVISTÄ TEKIJÖISTÄ

### JOHDANTO

Edellisissä esityksissä on käsitelty tiivistämisen teoriaa ja tiivistyskalustoa. Tämän esityksen aiheena ovat tiivistyskaluston valintaan ja käyttöön liittyvät tekijät. Tarkoitus on, että näitä kysymyksiä käsitellään käytännön kannalta, siis työn suorittajan näkökulmasta. Kuitenkin joudutaan tavan takaa palaamaan teoreettisluonteisiin kysymyksiin ja tutkimustuloksiin. Tiivistäminen on nimittäin yleensä hyvin monitahoinen kysymys. Työtä tehdään monenlaisella kalustolla, erilaisilla tavoilla ja hyvin erilaisissa olosuhteissa. Rakentajalla on kokemuksia määrätyistä tapauksista ja ne auttavat häntä seuraavien töiden suunnittelussa ja suorituksessa, mutta on välttämätöntä, että hän tietää pääpiirteissään, miten eri tekijät vaikuttavat tiivistystyöhön. Kun aikaisempia kokemuksia käytetään hyväksi, on tiedettävä, mitkä tekijät ovat olleet vaikuttamassa tiivistystyön onnistumiseen tai epäonnistumiseen. Aikaisempien kokemusten perusteella voidaan tehdä virheratkaisuja, ellei syitä tunneta.

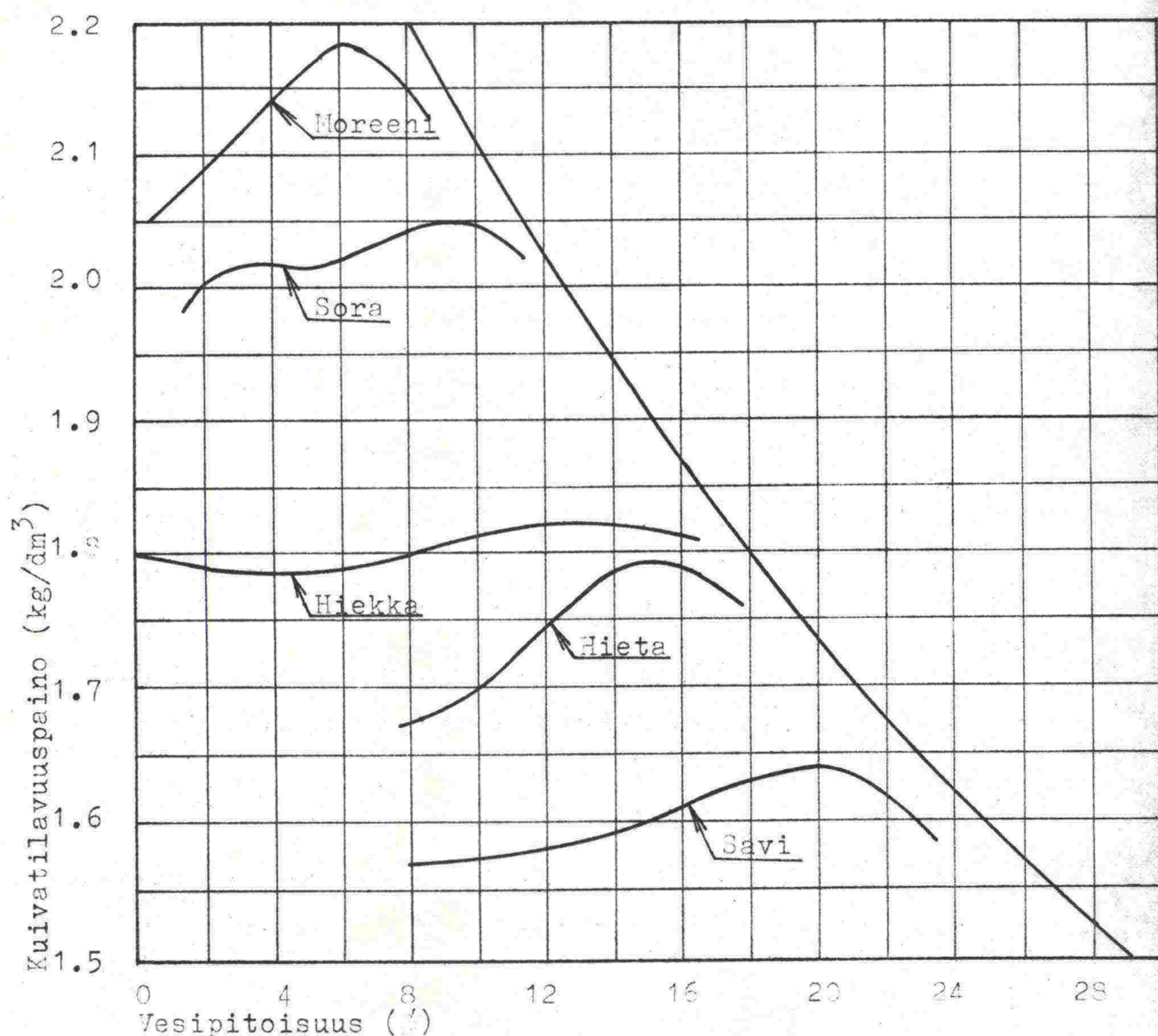
Tiivistyskaluston käyttömahdollisuudet on myös tunnettava. Kullakin tiivistyskonetyypillä on omat edullisimmat käyttöalueensa vaikkakaan jyrkkiä rajoja ei voida asettaa.

Tiivistystyön suoritukseen vaikuttavat monet tekijät ovat usein toisistaan riippuvaisia. Siksi on mahdotonta selvittää kunkin tekijän vaikutusta täydellisesti erikseen, vaan eri tekijöiden osuutta selvitettäessä on viitattava usein johonkin muuhun tekijään. Seuraavassa käsitellään kohta kohdalta erilaisia tekijöitä.



## 2.1 MAALAJI

Maalaji on tärkeimpiä tiivistyskaluston valintaan ja käyttöön vaikuttavista tekijöistä. Maalajista riippuu, mikä on tiivistyksellä saavutettava kuivatilavuuspaino ja mikä on optimivesipitoisuus. Kuvassa 1 on esitetty vesipitoisuus / kuivatilavuuspainokäyriä eri maalajeilla. Käyrien muotoon vaikuttaa huomattavasti rakeisuuskäyrän muoto.



Kuva 1. Vesipitoisuuden ja kuivatilavuuspainon välinen yhteys eri maalajeilla.

Taulukossa 1 on esitetty optimivesipitoisuuden ja maksimikuivatilavuuspainon arvoja eri maalajeilla.

maalaji	$\omega$ opt. (%)	$\gamma$ maks (t/m <sup>3</sup> )
Sa	20 - 30	1.4 - 1.7
Hs HtHs	15 - 25	1.6 - 1.8
Ht Hk	5 - 15	1.7 - 2.2
Sr SrMr	5 - 10	2.0 - 2.2
HsMr HtMr HkMr	5 - 10	2.0 - 2.3

Taulukko 1. Eri maalajien optimivesipitoisuudet ja maksimikuivatilavuuspainot.

Maalaji vaikuttaa myös siihen työmäärään, joka on tarpeen, jotta maa saataisiin tiivistetyksi vaadittuun tiiveyteen. Karkearakeiset, hyvin vettä läpäisevät kitka-  
maat tiivistyvät pienemmällä työmäärällä kuin tiiviit koheesiomaat. Rakentajan on tunnettava tämä tosiasia, jotta hän saisi tuntuman siitä, millaisella työmäärällä ja millaisella kalustolla hän voi eri olosuhteissa saavuttaa tuloksia.

Maalaji vaikuttaa myös kerralla tiivistettävän kerroksen paksuuteen. Tiivistystyössä päästään pienimmällä työmäärällä, jos kerros on ohut. Levitystyö vastaavasti on tällöin suurempi. Paksua kerrosta tiivistettäessä ei paine kerroksen alaosassa ehkä enää riittä vaaditun tiiveyden aikaansaamiseen. Koheesiomaa vaatisi suuremman paineen kuin kitkamaa. Tiivistymisen seurauksena maasta poistuu ilmaa ja osaksi myös vettä.

Tämä on hienorakeisessa maassa vaikeampaa kuin karkearakeisessa. Näiden syiden takia on kerrospaksuussien koheesiomailla oltava pienempiä kuin kitkamailla. Vesipitoisuus vaikuttaa kuitenkin paljon asiaan. Sitä käsitellään jäljempänä.

Eri jyrätyyppien soveltuvuudesta erilaisten maalajien tiivistyvyyteen on esiintynyt erilaisia käsityksiä. Yleensä katsotaan, että täryjyrät ja yleensä täryperiaatteella toimivat tiivistyskoneet sopivat parhaiten kitkamaiden tiivistykseen. Kumipyöräjiä voidaan käyttää erilaisilla maalajeilla. Sorkkajyriä on käytetty lähinnä koheesiomaalajien ja ns. välimaalajien tiivistyksessä. Täryjyrien käytöstä koheesiomaalajien tiivistämiseen on oltu eri mieltä. Välimaalajien, kuten hieta- ja hiesumoreenin tiivistyksessä on täryjyrällä saatu hyviä tiivistystuloksia myös talviolosuhteissa. Eräät tutkijat ovat tulleet siihen tulokseen, että täryjyrällä saadaan hyviä tuloksia myös koheesiomailla.

## 2.2 RAKEISUUS JA KIVISYYS

Maalaji ei yksinään määrää maa-aineksen tiivistymisominaisuuksia. Rakeisuuskäyrän muodolla on huomattava vaikutus. Suurin tiiveys saavutetaan, kun raakeisuuskäyrä on suunnilleen ns. Fullerin käyrän muotoinen. Tämä käyrä voidaan esittää seuraavasti:

Läpäisyprosentti määrättyllä seulalla =  $\frac{\sqrt{\text{seulan koko}}}{\text{max.raekoko}}$

Käyrä voidaan esittää myös seuraavasti  $\frac{p_1}{p_2} = \sqrt{d_1/d_2}$



Kiviaines, jolla on tällainen rakeisuuskäyrä, on hyvin tiivistyvää.

Tie- ja vesirakennuslaitoksen alusrakennetta ja päällysrakenteen sitomattomia kerroksia koskevien laadunvalvontaohjeiden mukaan olisi jakavan ja kantavan kerroksen rakeisuuskäyrän täytettävä ehto

$$\frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} = 1...3.$$

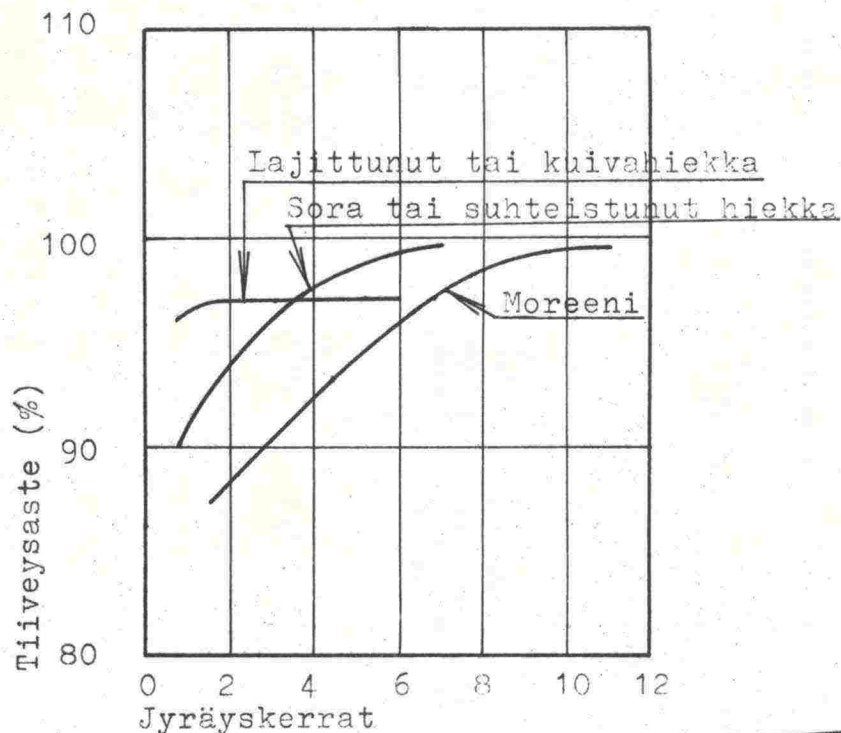
Maarakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeita osan V mukaan olisi raekokosuhteen  $D_{60}/D_{10}$  oltava eristyskerroksella vähintään 7 ja jakavalla kerroksella vähintään 12 mutta mieluummin yli 15.

Jos rakeisuuskäyrän muoto on huono, voidaan vaadittujen tiiviys- ja kantavuusarvojen saavuttamiseksi joutua tekemään paljon työtä. Tasarakeiset kitkamaalajit, joissa ei ole riittävästi hienoa ainesta, ovat kaikilla tiivistysmenetelmillä vaikeat tiivistää siihen tiiviyteen, mikä proctor-kokeella saavutetaan. Tiivistyminen on nopeata, mutta tiiviysarvo jää heikoksi. (kuva 2). Eräs asiaan vaikuttava tekijä on myös se, että tällaisessa maassa ei pysy optimivesipitoisuuden edellyttämää vesimäärää.

Useissa tapauksissa on tiivistystyön helpottamiseksi ja riittävien kantavuusarvojen saamiseksi tarkoituksenmukaista parantaa rakeisuuskäyrää sopivaa kiviainesta lisäämällä.

Rakeisuus vaikuttaa myös optimivesipitoisuuteen ja ns. proctor-käyrän muotoon, t.s. siihen miten suuri merkitys vesipitoisuudella tiivistystyössä on.

Kivisyys vaikuttaa usein ratkaisevasti tiivistystyön suoritukseen. Kivien koko määrää usein kerralla tiivistettävän kerroksen paksuuden. Kivisyys voi myös estää esim. tärjyrän tai sorkkajyrän käytön.

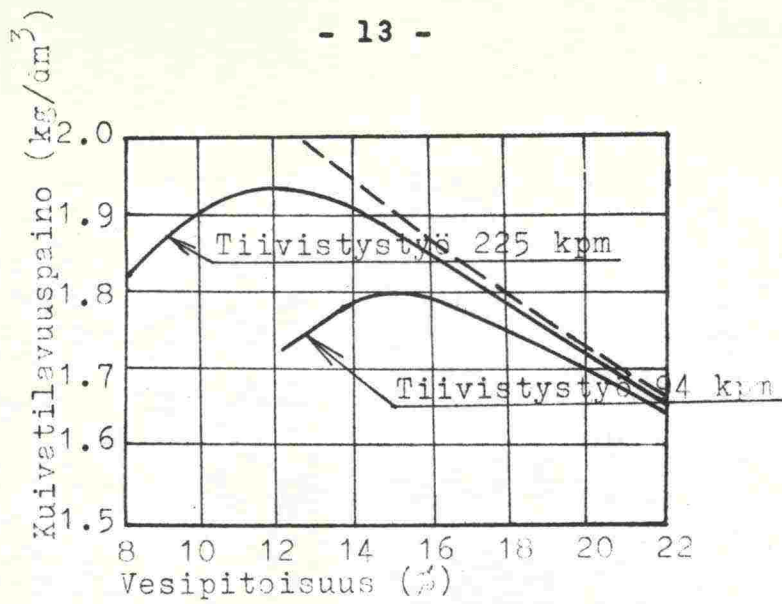


Kuva 2. Tiiveysasteen ja jyräyskertojen välinen yhteys.

### 2.3 VESIPITOISUUS

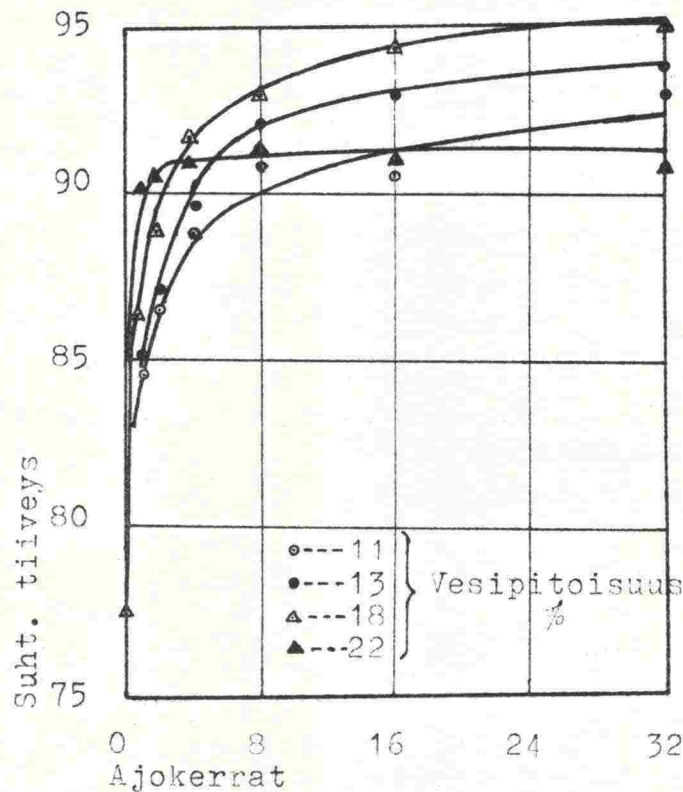
Vesipitoisuuden merkitys tiivistystyössä on pääpiirteiltään yleisesti tunnettu. Määrätyssä vesipitoisuudessa maa saavuttaa tietyllä työmäärällä suurimman tiiviytensä. Tämän edullisimman vesipitoisuuden saavuttaminen on kuitenkin usein vaikeata jopa mahdotontakin. Aina ei vesipitoisuuden parantamiseen kannata pyrkiäkään.

On huomattava, että optimivesipitoisuuden arvo riippuu myös työmäärästä. Tämä käy ilmi esim. kuvasta 3.



Kuva 3. Vesipitoisuuden ja tiivistystyömäärän vaikutus kuivatilavuuspainoon.

Vesipitoisuudesta riippuu myös, millaisella työmäärällä maa tiivistyy lopulliseen tiiviyteensä. Suurella vesipitoisuudella maa voi tiivistyä nopeasti, mutta tiiviys jää pieneksi. Esimerkki tällaisesta tapauksesta on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Saven tiivistyminen eri vesipitoisuuksilla kumipyöräajurilla tiivistettäessä (Periaatepiirros)



Tällöin on syytä selvittää, miten paljon tämä alitus vaikuttaa saavutettavissa olevaan tiiveyteen ja voidaan ja millaisilla kustannuksilla vesipitoisuutta nostaa sekä miten paljon tämä helpottaisi tiivistystyötä. Vasta tämän selvittelyn jälkeen ratkaistaan, ryhdytäänkö kastelemaan, ellei sitten jo etukäteen voida katsoa kastelua joka tapauksessa tarvittavan.

Jos vesipitoisuus on lähellä optimiarvoa, on selvitetävää, onko odotettavissa, että vesipitoisuus työn aikana esim. sateen takia nousee yli optimin. Hienorakeisilla maalajeilla joudutaan hyvin helposti tilanteeseen, jolloin tiivistäminen on mahdotonta.

Vesipitoisuuden ollessa yli optimin on muilla kuin kearakeisilla maalajeilla työ siirrettävä sopivampaan aikaan.

Koska vesipitoisuus vaikuttaa huomattavasti tiivistystyön suoritukseen, on todellinen vesipitoisuus ja optimivesipitoisuus syytä selvittää etukäteen.

#### 2.4 SÄÄOLOSUHTEET

Talvitiivistämistä käsitellään erikseen näillä kursseilla, joten siihen ei tässä yhteydessä puututa. Totean vain, että lämpötilalla on vaikutuksensa maan tiivistymiseen jo ennen maan jäätymistäkin.

Sääolosuhteilla on luonnollisesti suuri merkitys tiivistystyön ajoitukselle ja suoritukselle, koska ne vaikuttavat ratkaisevasti vesipitoisuuteen. Maalajista riippuen sääolosuhteet voivat täysin määrätä sen, milloin voidaan tehdä sellaisia työvaiheita, joihin sisältyy tiivistystyötä. Jos työ yritetään tehdä epäedullisten säiden vallitessa tai ennen kuin maa on ehtinyt riittävästi kui-

vua, on työstä useissa tapauksissa enemmän vahinkoa kuin hyötyä.

## 2.5 TYÖN SUURUUS JA LAATU

Työn suuruus ja laatu vaikuttavat luonnollisesti ratkaisevasti siihen, millainen tiivistyskalusto valitaan ja miten sitä käytetään. Suurissa kohteissa, joissa on paljon yhtäjaksoista työtä, kannattaako käyttää suuria koneita. Niillä saadaan yleensä alhaisia yksikköhintoja. Pienissä kohteissa käytetään pienempiä koneita, joilla työmenetelmätkin, esim. kerrospaksuudet, ovat toiset. Erityisesti harkitaan, voidaanko tiivistäminen suorittaa muilla kuin varsinaisilla tiivistyskoneilla, esim. levityskoneella. Usein tämä onkin mahdollista ja kannattavaa.

Työmaaliikenne on varsin tehokas rakenteiden tiivistäjä. Se olisi kuitenkin välttämättä jaettava koko tien leveydelle. Ellei näin menetellä, liikenne kulkee raiteissa ja tiivistää vain niiden kohtia. Onkin todettu huomattavia eroja raiteiden kohdilta ja vierestä mitatuissa tiiviyksissä. Raiteissa ajava työmaaliikenne voi myös aiheuttaa kerrosten alapuolelle pysyviä vikoja.

Yleinen liikenne tiivistää myös tehokkaasti. Siitä aiheutuu kuitenkin paljon lisäkustannuksia. Perusparannustyömailla joudutaan yleensä tiivistämään niin ohuita kerroksia, että tarvittava tiivistystyö on varsin pieni. Niillä lieneekin yleisestä liikenteestä paljon enemmän haittaa kuin hyötyä.

## 2.6 KERRALLA TIIVISTETTÄVÄN KERROKSEN PAKSUUS

Edellä on jo mainittu, että kerralla tiivistettävän kerroksen paksuus riippuu mm. maalajista ja kivien koosta.

Tiivistyskaluston laatu vaikuttaa huomattavasti kerrospaksuuteen. Staattisten jyrien syvyysvaikutus on pienempi kuin täryjyrien. Suomessa ovat kerralla tiivistettävien kerrosten paksuudet varsin suuria. 50 ja jopa 70 cm:n paksuudet ovat tavallisia. Esim. USA:ssa ovat kerrospaksuudet yleensä 25-30 cm painavillakin jyryillä.

Tiiviysvaatimus olisi täytettävä koko kerroksessa, ei ainoastaan yläosassa. Onkin kyseenalaista, saavutetaanko läheskään aina vaadittuja tiiviyyksiä myös kerroksen alaosassa.

Raskaat täryjyrät ovat kokeissa osoittaneet varsin hyviä tuloksia syvyysvaikutusta ajatellen.

Taulukossa 2 on esitetty ruotsalaisen Forsbladin suositus kerralla tiivistettävien kerrosten paksuuksista tärylevyillä ja täryjyryillä optimivesipitoisuudessa ja taulukossa 3 saksalaisen Banaschek'in suositus kerrospaksuuksista kumipyöräjyryillä.

Maalaji	Kerrospaksuus (m)			
	tärylevy 100-200 kg	tärylevy 400-600 kg	tärylevy 1-2 tn	täryjyry 3-4 tn
Sr Hk kHt SrMr HkMr hHt Ms Sa	0.20	0.30	0.40	0.50
	-	0.15	0.20	0.30
Jyryys- kerrat	4	4	6	6

Taulukko 2. Kerrospaksuudet ja jyryskerrat tärylevyillä ja täryjyryillä.



Tiivistettävän kerroksen paksuus (cm)	Pyöräpaino (tn)
30	1.4 - 1.7
50	2.2 - 2.5
70	4.0 - 4.5

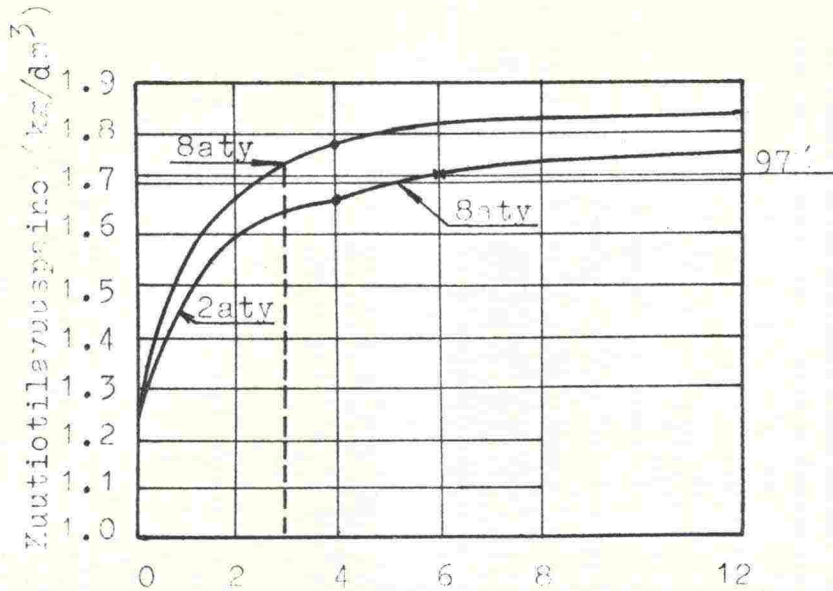
Taulukko 3. Tiivistettävän kerroksen paksuuden riippuvuus pyöräpainosta.

## 2.7 AJONOPEUS

Ajonopeus vaikuttaa huomattavasti tiivistystyön taloudellisuuteen. Suurella ajonopeudella saadaan luonnollisesti aikayksikössä suurempi ala tiivistetyksi kuin pienellä nopeudella. Tiivistysvaikutus yhtä ajokertaa kohti alkaa kuitenkin nopeuden kasvaessa pienentyä. Myös jyräyskalusto asettaa ajonopeudelle omat rajoituksensa. On olemassa määrätty optimaalinen ajonopeus, jolla tietyn jyrän käyttö tietyissä olosuhteissa on edullisinta. Mikä tämä edullisin ajonopeus on, ei tietävästi ole kovinkaan paljoa tutkittu. Ilmeisesti kuitenkin kannattaisi käyttää suurempia nopeuksia kuin mihin meillä on yleensä totuttu.

## 2.8 RENGASPAINE

Kumipyöräjyrillä jyrättäessä saavutetaan suurin tiivistysteho lähellä pintaa, jos rengaspaine on niin suuri kuin mahdollista. Kuvassa 5 on esitetty esimerkki tästä. Usein kuitenkin on aluksi ajettava pienemmällä rengaspaineella, jotta jyrä pääsisi liikkumaan.



Kuva 5. Rengaspaineen vaikutus jyräsykertamääriin.

Syvennällä ei rengaspaineella ole niin suurta merkitystä. Siellä lähinnä pyöräpaineen suuruus ratkaisee tiivistystyön tehokkuuden.

## 2.9 TIIIVISTYSTYÖN MÄÄRÄ

Tiivistystyön pintakapasiteetti voidaan ilmoittaa seuraavalla kaavalla:

$$y = C_y \times \frac{B \cdot v \cdot 1000}{n} \left[ \text{m}^2/\text{h} \right]$$

$C_y$  = vähennystekijä

$B$  = valssin leveys

$v$  = jyrän nopeus

$n$  = jyräyskertojen määrä

Kertoimen  $C_y$  arvo riippuu mm. siitä, miten paljon jyrä kulkee edellisellä ajokerralla jyrätyn kaistan päällä, ja miten paljon jyrällä on käännöksiä. Jos jyräystyö

on niin järjestetty, että jyrä kulkee vain lyhyen matkan yhteen suuntaan ja palaa sitten takaisin, on tiivistystyön teho huomoinpi kuin silloin, jos jyrättävä alue on pitkä. Myös ajonopeus vaikuttaa kertoimen arvoon. Jos nopeus on niin suuri, että tarvittavan tiiviyn saamiseksi on ajokertoja lisättävä, kuluu käännöksiin suhteellisesti enemmän aikaa. Cy-arvoille on täryjyrillä nopeuksilla 1,5 3 ja 6 km/h esitetty seuraavat likimääräiset arvot 0.80, 0.75, 0.60.

Edellä on jo mainittu, mitkä tekijät ennen kaikkea vaikuttavat tiivistystyön määrään  $m^3$ :ä kohti. Kerrattakoon ne vielä:

- Maalaji: Hienorakeiset, huonosti vettä läpäisevät vaativat enemmän tiivistystyötä kuin karkearakeiset.
- Rakeisuus: Huonosti tiivistyvät vaativat paljon tiivistystyötä riittävien tiiviys- ja kantavuusarvojen saavuttamiseksi. Tasarakeisilla materiaaleilla voi riittävän hyvien arvojen saavuttaminen olla mahdotonta vaikka työmäärää lisättäisiinkin.
- Vesipitoisuus: Optimivesipitoisuus on edullisin saavutetun tiiviyn ja työmäärän kannalta. Korkeilla vesipitoisuuksilla lopullinen tiiviys saavutetaan nopeasti, mutta tiiviys voi jäädä heikoksi maalajista riippuen.
- Kerralla tiivistettävän kerroksen paksuus. Paksu kerros vaatii suuremman työmäärän  $m^3$ :ä kohti.

Lisättäessä työmäärää ajokertoja lisäämällä on selvää, että ensimmäisillä ajokerroilla saadaan eniten aikaan. Tiiviyn kasvu ajokertaa kohti hidastuu ajokertojen määrän kasvaessa, joten nämä viimeiset ajokerrat ovat tuloksiin nähden kalliita, voipa tiiviys välillä pienetäkin. Monilla ajokerroilla ei myöskään syvyysvaikutusta voida paljoa parantaa.



DIPL.INS: A. SAARELA  
V TIIVISTÄMISTYÖN KUSTANNUKSET  
JA TYÖNSUUNNITTELU

## V TIIVISTÄMISTYÖN KUSTANNUKSET JA TYÖNSUUNNITTELU

### 1. KERROSTEN RAKENTAMISEEN LIITTYVIÄ KUSTANNUSTIETOJA

V. 1969 aikana levitettiin kerrosmateriaaleja kaikkiaan n. 10 milj. m<sup>3</sup>itd. Levityskustannukset olivat samana vuonna n. 19 milj.mk. Tiivistyskoneiden aiheuttamat kustannukset olivat n. 5,3 milj.mk. Rakentamisvaiheiden ajoituksesta voidaan todeta, että levitystä suoritettiin eniten maaliskuussa, kun taas tiivistystä tehtiin eniten heinäkuussa (kustannusten valossa). Tiehöylät aiheuttivat n. 3,8 milj.mk kustannuksen, josta suurin menoerä kohdistui heinäkuulle (n. 0,65 milj.mk). Kokonaisrakentamiskustannukset kerrosten osalta olivat n. 77 milj.mk.

Tie- ja vesirakennuslaitoksen kone-  
työluetteloista noimittu tilasto  
tiivistyskonekustannuksista

vuodelta 1969

Kuukausi	Kustannus mk
Tamm	209.848,-
Helmi	250.521,-
Maalis	271.549,-
Huhti	249.947,-
Touko	447.951,-
Kesä	779.190,-
Heinä	1.046.990,-
Elo	922.530,-
Syys	598.619,-
Loka	395.709,-
Marras	243.770,-
Joulu	185.189,-
Yhteensä mk	5.601.813,-

## 2. TIIVISTYSKUSTANNUKSIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

### YLEISTÄ

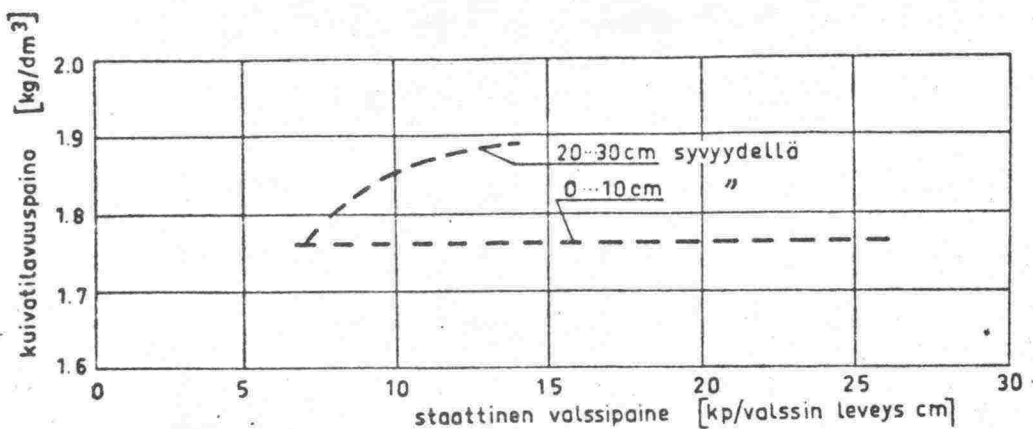
Tiivistyskustannukset riippuvat tiivistystyömäärästä, mikä on kääntäen verrannollinen tiivistyskapasiteettiin nähden. Työmäärään vaikuttavat koneen ominaisuudet, tiivistettävän kerroksen paksuus, kerrosmateriaalin tilavuuspaino ennen tiivistystä, materiaalin rakeisuus ja kosteus sekä alustan laatu.

### 2.1 TIIVISTYSTYÖMÄÄRÄÄN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Tietyömailla käytetään yleensä kolmea eri jyrää kerrosten tiivistämisessä: raskasta ( $>7,5$  tn) ja keskiraskasta ( $5,0-17,5$  tn) tärjyriä sekä kumipyöräjiä ( $>20$  tn).

#### 2.1.1 Tärjyriä

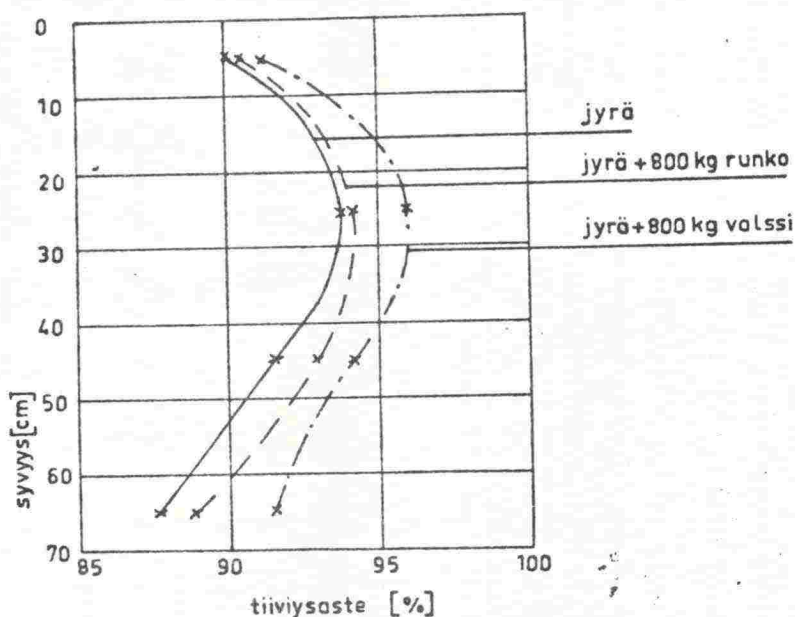
Tärjyriän tiivistysvaikutus riippuu maahan siirtyneen tärjyenergian määrästä. Tärjyenergia riippuu mm. tärjyvoimasta, mihin vaikuttaa epäkeskomassa, tärjyliikkeen epäkeskisyys ja sen taajuus. Lisäksi tärjyliikkeen suunnalla on merkitystä tiivistyvyyteen. Epäkeskomassan suuruus vaikuttaa tiivistysyvyyteen, mutta ei pintatiivistyvyyteen. Jyrän painon lisääminen vaikuttaa lisäksi tehokkaimmin silloin, kun se suoritetaan jyrän runkoon eikä valssiin.



Kuva 1. Valssipaineen vaikutus kuivatilavuuspainoon.



Sopiva epäkesko lienee hiekkamateriaaleilla (esim. eristyshiekka noin 1,2 mm. Vastaavasti sorassa lienee sopiva amplitudi  $< 1,2$  mm tiivistettäessä pintakerrosta, mutta 30-40 cm syvyydessä ei amplitudeilla 1,2...4,1 mm ilmeisesti ole eriävää vaikutusta tiivistymiseen.



Kuva 2. Jyrän valssin ja rungon painon muuttamisen vaikutus tiivistämiseen.

Suuremmilla amplitudeilla on kuitenkin vaikutusta koneen syvyysvaikutukseen, esim. 60-100 cm syvyydessä. Suuresta amplitudista on puolestaan haitallisena seurauksena pintakerroksen löyhtyminen, koska pintarakeet alkavat värähdellä liiallisesti. Tällöin on suoritettava erityistä jälkitiivistystä esim. staattisesti ilman täryä tai kumipyöräjyrällä. Tarkasteltaessa tavallisesti käytössä olevia täryjyriä, voidaan amplitudin arvoja 0,8-1,2 mm pitää sopivina tienrakennuksessa. Ylempien kerrosten irtoamisen vuoksi on olemassa maalajista ja käytettävästä täryjyrästä riippuva optimijyräyskertoamäärä, jota ei pitäisi ylittää. Pintatiivistä samoin kuin tiivistymisen syvyysvaikutusta voidaan parantaa käyttämällä sellaisia tärykoneita, joiden täryvaikutus on suunnattua (vertailukohteena tavanomaiset ympyrävärähtelyn periaatteella toimivat jyrät).

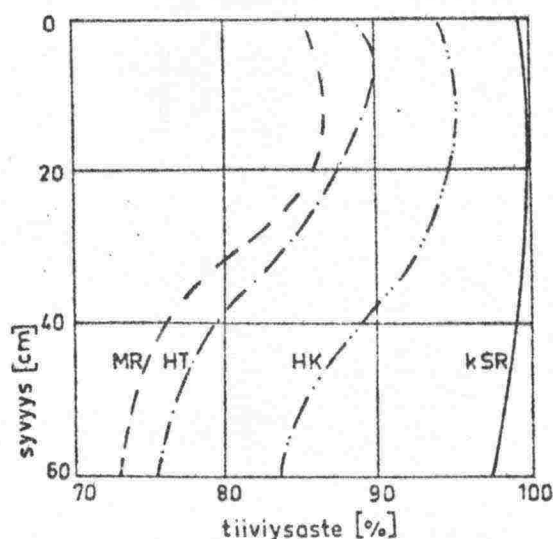
Koneen sopiva värähdystaajuus riippuu ensisijaisesti materiaalista

MATERIAALI	OMINAISVÄRTEYTESI r/min
Tv	750
Hk	1145
srHk	1165
Hk	1445
kHk	1570
Sa	1650
Sr	1700

Taulukko 1. Eri materiaalien ominaisvärteylukuja

## 2.1.2 Materiaalin vaikutus täryjyrän tiivistystyömäärään

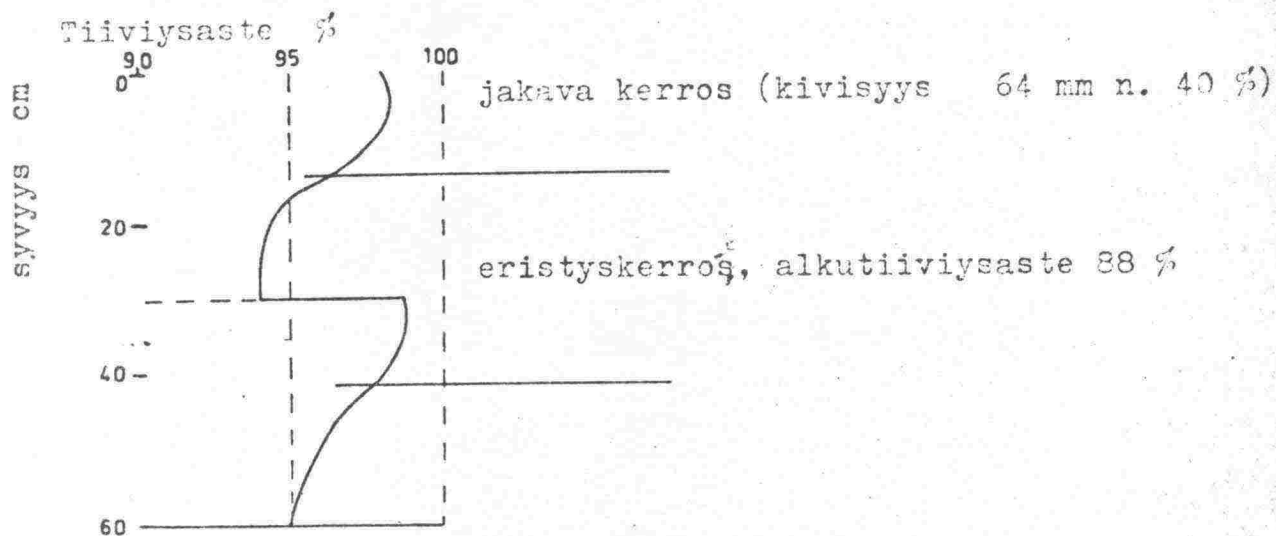
Tarkasteltaessa kärkeä soraa, voidaan havaita, että sen suhteellinen maksimitiiviyys saavutetaan n. 20 cm syvyydessä, jonka jälkeen tiiviyys alenee varsin hitaasti. Näin ollen ei ksr-kerroksia kannata ilmeisesti tiivistää, mikäli mahdollista, alle 40-60 cm kerroksina.



Kuva 3. Mr, kSr, Hk ja Ht-materiaalien syvyyttiiviyyskäyrät

Tällainen ksr-kerros voidaan saada optimaalisuudessa 37 % -tiiviyysasteeseen 2 jyräyskerralla kärkeällä (>7,5 m³ täryjyrällä nopeutta 3-4 km/h käyttämällä.

Kantava kerros (alaosa) tiivistyy 97 % tiiviyyteen parannetusta proctor-tiiviyydestä keskiraskaalla täräyttäjällä noin 3...10 jyräyskerralla jyräysnopeudesta ( = 3-6 km/h) ja materiaalin kosteudesta riippuen. Jakavan kerroksen tiivistäminen on yleensä sikäli erikoisessa asemassa, että jakava kerros sijaitsee pehmeähkön eristyshiekan päällä. Tällöin eristyskerros toimii eräänlaisena iskunvaimentajana ja tästä syystä jakavan kerroksen alaosan tiivistyminen saattaa vaikeutua. Toinen syy jakavan kerroksen tiivistämisvaikeuteen on luonnonmateriaaleilla niiden rakeisuus. Tällaiset luonnonmateriaalit sisältävät yleensä suurehkoja kiviä (väläyttynäkin), jotka pyrkivät lajittumaan kerroksen alaosaan muodostaen onkalorakenteita.



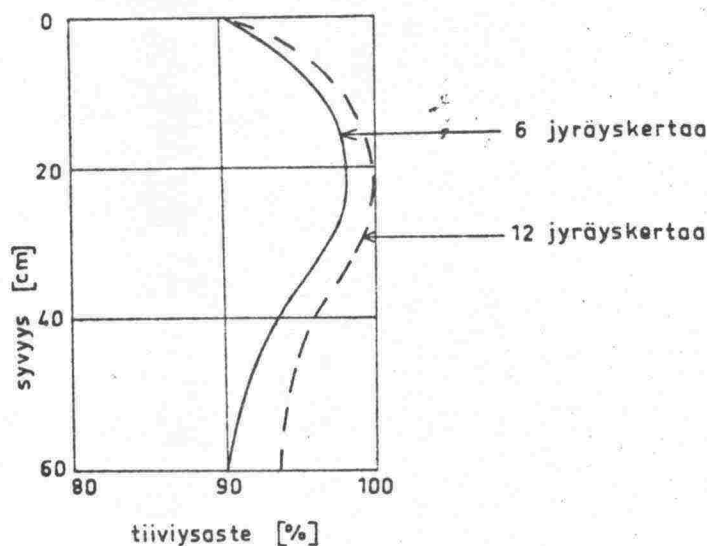
Kuva 4. Tiivistämättömän eristyskerroksen vaikutus jakavan kerroksen (luonnon sora) tiivistymiseen (raskas täräyttäjä, = 3,0 km/h, 8 jyräyskertaa)

Jakavan kerroksen pinnassa voidaan raskaalla täräyttäjällä saavuttaa vaadittava 97 %-tiiviysaste jo 1-3 jyräyskerralla nopeudesta riippuen, mutta kerroksen alaosan tiivistämiseksi voidaan tarvita jopa 15-20 jyräyskertaa. Jakava kerros tulisi kastella materiaalin optimikosteuteen, mikä tapahtunee melko helposti. Mikäli jakavan kerroksen kiviaines on murskattua tai väläyttyny sopivan kokoiseksi, ei edellä mainittua lajittumista ilmeisesti tapahdu niin runsaasti ja kerroksen tiivistyminen nopeutuu (alkutiiviyskin yleensä melko suuri). Eristyskerroksen ollessa yli 95 % tiiviudessa ja jakavan kerroksen materiaalin ollessa ohjealueen mukaista sekä optimikosteen, on mahdollista tiivistää

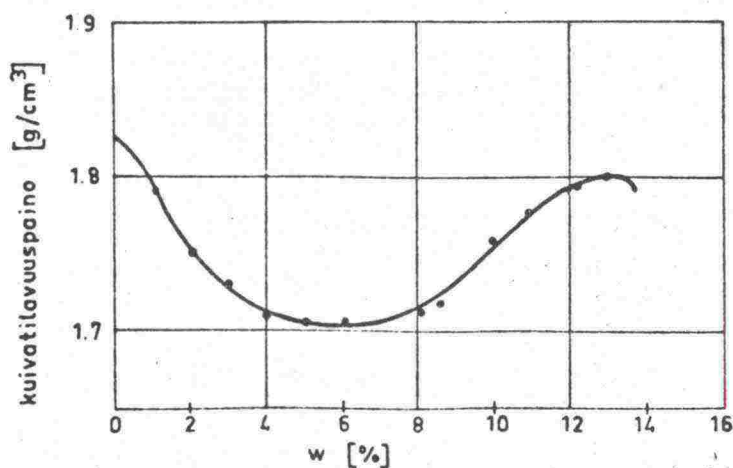


jakava kerros 2-6 jyräyskerralla n. 3.0-4.0 km/h nopeudella raskaalla ja keskiraskaalla täryjyrällä vaadittuun tiiviyyteen. Kosteuspitoisuuden vaikutus on melko ratkaiseva tiivistystyömäärään. Esim. eräässä kokeessa saavutettiin optimikosteassa ( $\approx 9.6\%$ ) jakavan kerroksen materiaalissa tiiviysaste 103 % samalla työmäärällä kuin 8,2 % kosteassa materiaalissa tiiviysaste 94 % (olosuhteet ja kone samat).

Eristyskerros, jonka paksuus on 30...40 cm ja jonka materiaalin kosteus on joko optimi tai 0...1 %, voidaan tiivistää vaadittavaan 95 % tiiviysasteeseen täryjyrällä ( $>3,0$  tn) 2-6 jyräyskerralla jyrän painosta ja nopeudesta ( $\geq 3,0$  km/h) riippuen. Eristyskerroksessa ilmenee tiivein kohta yleensä n. 15-20 cm syvyydessä tärytiivistyksessä. Pinta saattaa jäädä irtonaiseksi, jolloin suoritetaan jälkitiivistystä ilman täryä (tai kumi-pyöräjyrällä).



Kuva 5. Keskiraskaan täryjyrän syvyysvaikutus eristyskerroksessa



Kuva 6. Vesipitoisuuden vaikutus kuivatilavuuspainoon eristys-hiekassa

Mikäli eristyskerrosta ei sen rakentamisvaiheessa tiivistetä riittävästi, tarvitaan tällöin jälkitiivistystä, mikä suoritetaan jakavan kerroksen päältä (kesällä). Tällaisessa tapauksessa tulee ilmeisesti olemaan vaikeuksia eristyskerroksen tiivistämisessä. Ensinnäkin eristyshiekan kastelu optimikosteuteen ei onnistune jakavan kerroksen päältä. Syinä tähän ovat

- 1) eristyshiekan optimivesipitoisuus on suurempi kuin jakavan kerroksen kyllästysraja, mistä on seurauksena, ettei jakava kerros läpäise riittävästi vettä

- 2) eristyshiekan veden pidätyskyky on huono, mistä seuraa, että vesi menee nopeasti kerroksen läpi valuen alusrakennetta pitkin luiskiin.

Näin ollen kerros saattaa tulla vajavaisesti kastelluksi,  $W \approx 4 \dots 8 \%$  (optimikosteus yleensä  $> 10 \%$ ), jolloin hiekan kuivatilavuuspaino saa minimiarvoja (kuva 6).

Tiiviyttä on tällöin vaikea saada suurellakaan tiivistystyömäärällä nousemaan riittävästi.

Näin ollen eristyskerrosta ei ilmeisesti kannata yrittää kastella kesätiivistyksen yhteydessä, vaan kannattaa tiivistää se luonnonkosteana. Tiivistystyömäärä riippuu suuresti rakentamisvaiheen aikaisesta (= talvi-) tiivistyksestä. Mikäli kerroksen alkutiiviysaste on n. 80-90 % voidaan eristyskerroksa saada jakavan kerroksen päältä vaadittavaan (95 %) tiiviYTEEN keskiraskaalla täryjyrällä n. 9...22 jyräyskerralla ja raskealla täryjyrällä noin 9...15 jyräyskerralla käytettäessä jyräysnopeutta 3.0...6.0 km/h (materiaalin kosteus noin 3...7 %).

Savea (esim. perusmaata) ei täryjyrillä pidä yrittää tiivistää. Tärytyksen vaikutuksesta tapahtuu savessa nimittäin osaksi hetkellistä leikkauslujuuden alenemista, osaksi pysyvää sisäisen lujuuden alenemista, jolloin materiaalin kantokyky heikkenee.

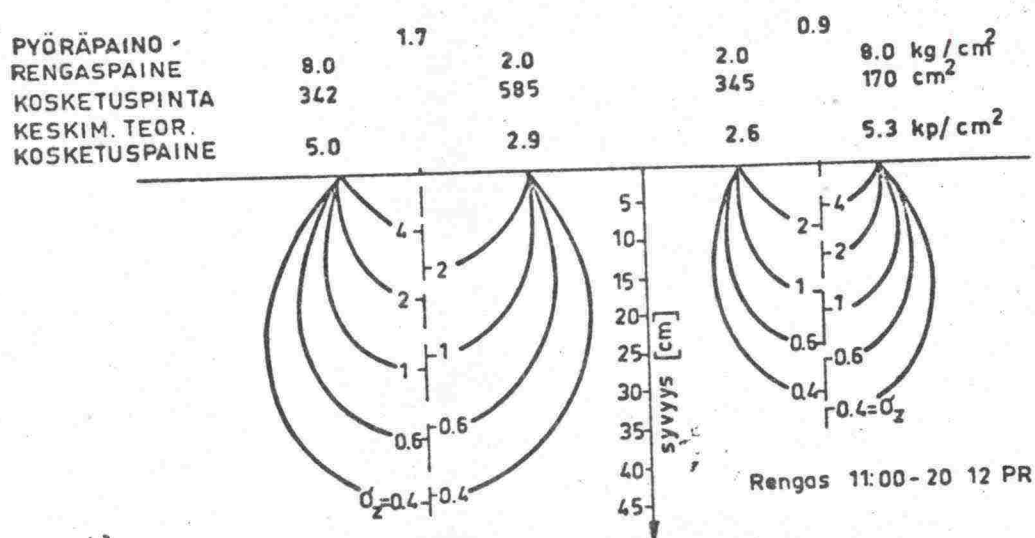
### 2.1.3 Kumipyöräjyrät

Kumipyöräjyrän tiivistystyömäärän suuruus riippuu mm. seuraa-



vista koneen ominaisuuksista: jyrän paino ja pyörien lukumäärä, ts. pyöräpaino, rengaspaine, jyräysnopeus, renkaitten mukautuminen maanpinnan epätasaisuuksiin.

Kumipyöräjyrän syvyysvaikutus riippuu pääasiassa vain pyöräkuormasta. Rengaspaineella ja siitä johtuvalla kosketuspaineella ei ole merkitystä tiivistyssyvyteen nähden suurehkoilla pyöräkuormalla yli 15 cm syvyydessä kerrosta.



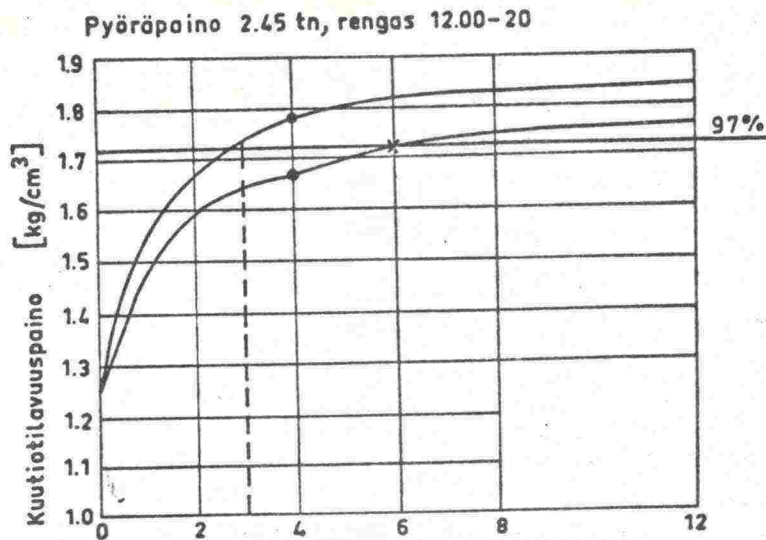
Kuva 7. Pyöräkuorman, kosketuspinnan, rengaspaineen ja kosketuspaineen vaikutus pystysuoraan puristusjännitykseen  $Z$  kp/cm<sup>2</sup>

Ohuita (n. 15...20 cm) kerroksia tiivistettäessä on tiivistystyömäärään nähden rengaspaineella kuitenkin merkitystä (kuva 8). Jo jyräyksen alusta lähtien tulisi rengaspaine olla mahdollisimman suuri (mieluummin 7.0-8.0 aty), koska tällöin jyräyskertamäärä pienenee, ts. tiivistyminen nopeutuu.

Rengaspaineella voidaan mm. säädellä pintapaine sellaiseksi, ettei pintakerroksen löyhtymistä (karheutusta) esiinny (alhainen rengaspaine → pieni pintapaine).

Tiivistystyömäärä on kääntäen verrannollinen jyrän kapasiteettiin. Kun tiivistyskoneen nopeus kasvaa, suurenee kapasiteetti ja näin ollen tiivistystyömäärä pienenee ja kustannukset alenevat.





Kuva 8. Rengaspaineen vaikutus jyräyskertamäärään.

Kumipyöräjyrällä pitäisi käyttää melko suurta nopeutta, noin 5-10 km/h. Suuresta nopeudesta on hyötyä, paitsi suuren kapasiteetin takia, myöskin syvyysvaikutuksen mahdollisen kasvun takia, sillä kovalla vauhdilla ajettaessa ilmenee usein epätasaisessa kerroksessa dynaamista vaikutusta (pomppiminen). Jyrän painon tulisi olla vähintään 25 tn, jotta pyöräpaine olisi suhteellisesti suuri.

#### 2.1.4 Materiaalin vaikutus kumipyöräjyrän tiivistystyömäärään

Kumipyöräjyrän käyttöalue käsittää sekä alusrakenteen että päällysrakenteen. Kuitenkaan louhe ja kivipenger ei sovellu kumipyöräjyrälle.

Kantavan kerroksen (alaosan) tiivistys soveltuu hyvin kumipyöräjyrälle. Yli 20 tn kumipyöräjyrällä (nopeus 5...10 km/h) voidaan 7-15 cm paksu kantava kerros saada riittävän (= 97 %) tiiviiksi n. 5...9 jyräyskerralla materiaalin kosteudesta riippuen. Kantava kerros voidaan kastella optimikosteuteen melko helposti ja lisäksi kerroksen alusta (= jakava kerros) on yleensä varsin kova, jolloin nopea tiivistyminen mahdollistuu.

Sen sijaan jakavan kerroksen tiivistäminen on monimutkaisempi. Syynä on materiaalin rakeisuuden moninaisuus. Kumipyöräjyrän tiivistysvaikutus on tehokkaimmillaan n. 10-20 cm syvyydessä materiaalin rakeisuudesta ja alustan laadusta riippuen. Sopiva

kerrospaksuus lienee n. 15-30 cm rakeisuudesta riippuen (tasarakeiset, suhteellisen kivettömät materiaalit paksumpia). Eri-tyisesti runsas kivisyys hidastaa tiivistymistä.

Optimikostea ja "hyvän rakeisuuden" omaava jakava kerros (paksuus 20-35 cm) voidaan tiivistää 97 % tiiviysasteeseen ~25 tn painavalla kumipyöräjyrällä n. 6-9 jyräyskerralla 5-10 km/h nopeudella. Kivisyyden lisääntyessä voidaan tarvita jopa 20-40 jyräyskertaa jakavan kerroksen tiivistämiseksi. Eräissä tapauksissa kannattaa harkita jakavan kerroksen tiivistämistä kahtena kerroksena.

Eristyskerroksen tiivistäminen voidaan tehdä yleensä joko talvella tai kesällä. Jälkimmäisessä tapauksessa tiivistys suoritetaan jakavan kerroksen päältä käsin. Tällöin lienee eristyskerroksen sopivan kastelun toteuttaminen vaikea jopa lähes mahdoton tehtävä, kuten täryjyrän tapauksessa todettiin. Näin ollen tulisi talvella kerroksen rakentamisen yhteydessä välittömästi suorittaa myöskin tiivistys.

Kun eristyskerroksen tiivistäminen suoritetaan saman kerroksen päältä, saavutetaan kerroksessa tiivein kohta n. 10 cm syvyydessä pinnasta käsin. Noin 25-30 cm syvyydessä tiiviys alkaa pienetä voimakkaasti, joten sitä paksumpia hiekkakerroksia ei kannattane yrittää tiivistää. Kumipyöräjyrällä, jonka paino on >20 tn, nopeus >5 km/h ja rengaspaine >4 aty, voidaan saada optimikostea 30 cm paksu eristyskerros 95 % tiiviyteen proctor-tiiviyydestä 14 jyräyskerralla. Mikäli kerrosmateriaalin kosteus on vajavainen (esim. 3...5 %) ei kerroksen tiivistäminen enää onnistu kohtuullisella (> 40-50 jyräyskertaa) tiivistystyöllä.

Jakavan kerroksen päältä suoritettuna tiivistys onnistunee kylläkin n. 14 jyräyskerralla myöskin, mutta hiekan tulee olla optimikostea. Jos kosteuspitoisuus on, kuten yleensä noin 4-8 % (optimikosteus >10 %) ei riittävää tiivistymistä enää ilmeisesti saada aikaan.



### 2.1.5 Tiiviys ja kantavuus

Edellä olleet tapaukset koskivat nk. tiiviysastekriteeriota, ts. pyrittiin vaadittavaan, laatuvaatimukset täyttävään tiiviyteen. Yleisesti on käytössä myös nk. kantavuuskriteerio, jolloin pyritään tiettyyn kantavuuteen jakavan kerroksen ja kantavan kerroksen sitomattoman osan osalta. Yleisesti ottaen täytyy todeta, että kantavuuskriteerio vaatii enemmän tiivistystyötä kuin tiiviysastekriteerio. Kantavuus todetaan levykantavuuskokeella. Levykantavuuskokeen "syvyysvaikutus" on n. 25-30 cm  $\phi$  30 cm levyllä.

Raskaalla ( $> 7,5$  tn) täryjyrällä voidaan saavuttaa jakavassa kerroksessa vaadittava ( $E_2 \geq 1250$  kp/cm<sup>2</sup>) kantavuus n. 20-25 jyräyskerran jälkeen käytettäessä 3,0 km/h nopeutta. Nopeuden kasvaessa myöskin jyräyskertojen lukumäärä kasvaa.

Keskiraskaalla (5,0-7,5 tn) täryjyrällä kantavuusarvot eivät enää riipu niin paljon jyräysnopeudesta ( $v = 3,0-6,0$  km/h) tarkasteltaessa jyräyskertamääriä. Kantavuusarvoon  $E_2 = 1250$  kp/cm<sup>2</sup> tarvittaneen n. 40-45 jyräyskertaa. Murskatulle materiaalille riittänee kuitenkin n. 20 jyräyskertaa.

Kumipyöräjyrällä ( $> 20$  tn), jonka nopeus on 5,0-10,0 km/h, tarvittaneen noin 20(...40) jyräyskertaa vaadittavan kantavuuden saavuttamiseksi. Murskesoralle riittänee n. 10...15 jyräyskertaa.

On kuitenkin todettava, ettei esitetyt jyräyskertamäärät ole suinkaan absoluuttisia, vaan suuntaa antavia. Kantavuusarvot riippuvat erityisesti materiaalin kosteudesta ja rakeisuudesta sekä tiivistämisen lopettamisesta kuluneesta ajasta. Esimerkiksi kastelun jälkeen jakavan kerroksen kosteus saattaa olla noin 6-7 %. Kun materiaali kuivuu 2-3 päivää, saattaa kosteus laskea noin 4 %-yksikköä, missä ajassa materiaalin sisäinen lujuus on ehtinyt jonkin verran palautua, tällöin saattaa  $E_2$ -arvo nousta 25-40 %. Tiivistystyömäärään nähden tällä seikalla on huomattava vaikutus.



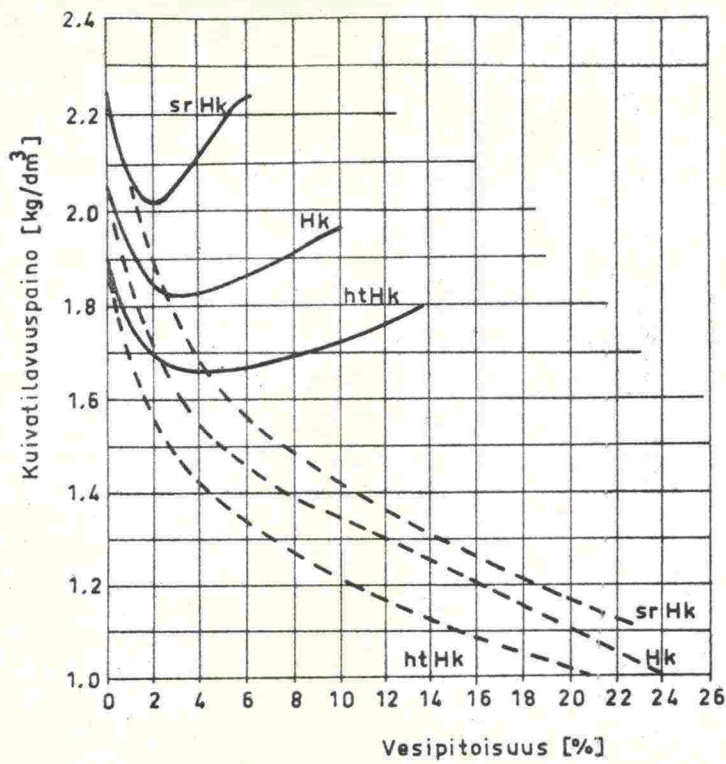
## 2.2 KUSTANNUSTEN ALENTAMISEEN TÄHTÄÄVÄT TUTKIMUKSET

### YLEISTÄ

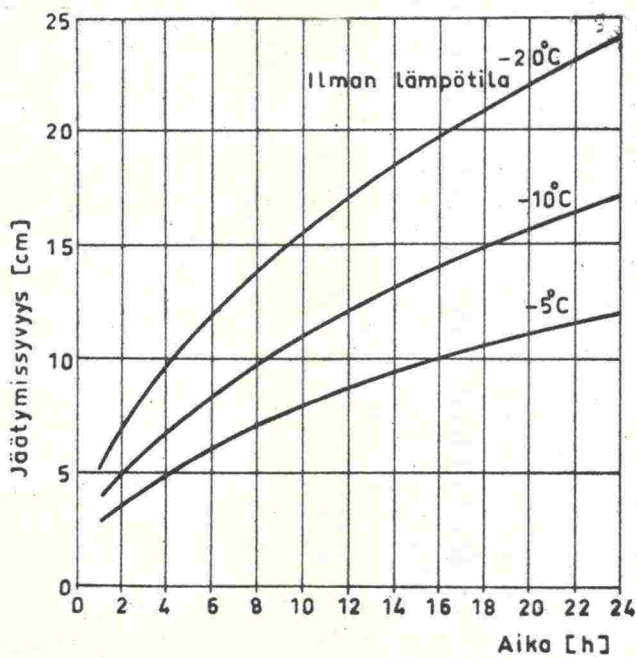
Penkereen ja sitomattomien kerrosten teko on varsin yleistä talvisaikaan. Koska pakkassäällä kerrosmateriaalin jäätyminen on nopeaa, on tiivistäminen levitystyön jälkeen tällöin ilmeisesti turhaa ja vain tuhlausta.

Kuvasta 9. ilmenee sorakerroksen jäätymisnopeus ja kuvasta 10. jäätymisen vaikutuksen seuraus tiiviyyteen.

Nyt kehitetyllä systeemillä pyritään suorittamaan edellä mainittujen tien osien rakentaminen siten, että käytetään samaa konetta samanaikaisesti sekä levityksessä että tiivistyksessä. Tällöin materiaali ilmeisesti tiivistyy sen ollessa vielä sulassa tilassa. Koneena käytettiin puskulevyllä varustettua TANA-kumipyöräjyrää.



KUVA 10. Jäätymisen vaikutus tiiviyyteen



KUVA 9. Sorakerroksen jäätymisnopeus, kun soran vesipitoisuus on 5 %

## 2.2.1 Eristyskerroksen rakentaminen

Eristyskerroksen rakentamisessa kykeni puskulevyllä varustettu TANA 30/90 V levittämään kaiken sen materiaalin, minkä työmaa-autot kykenivät tuomaan ( $K3 = 155 \dots 293 \text{ m}^3/\text{td}/\text{h}$ ).

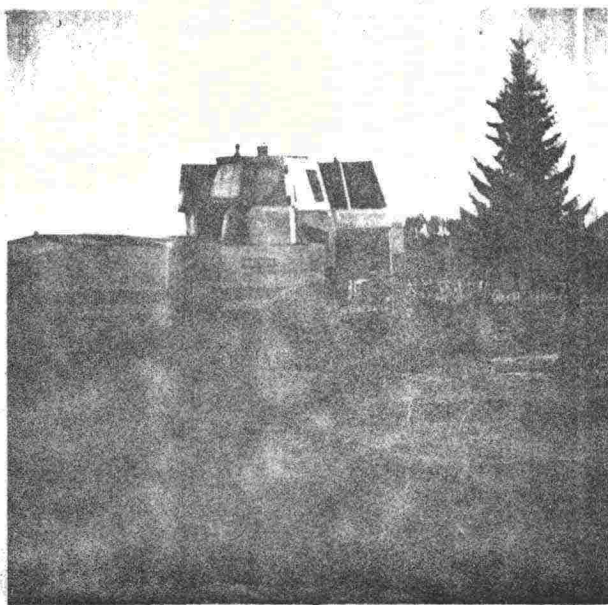
Liitteessä 8 ilmenee erään tutkimuksen tulokset levityksen, tiivistyksen ja tasoituksen osalta. Siinä kokeessa osoitettiin  $K3 = 140 \text{ m}^3/\text{td}/\text{h}$  ( $= K2 = 175 \text{ m}^3/\text{td}/\text{h}$ ) suurimmaksi kuormauskapasiteetiksi, jossa kerroksen tiiviys täytti laatuvaatimukset ( $D = 95 \%$ ). Tällöin TANA suoritti 11 jyräyskertaa, josta levityksen yhteydessä  $85 \%$  eli n. 9 jyräyskertaa. Tällä menetelmällä on mahdollisuus saada koko kerros, myöskin syvemmältä varsin tiiviiksi, yleensä jopa tiiviimmäksi kuin pintaosasta. Tämä johtunee siitä, että jyrä vajoaa aloittaessa uuden kuorman levittämisen lähes penkereeseen asti, jolloin tiivistämisalusta on kova ja jolloin kerros tulee kauttaaltaan jyrän pyörien välittömään vaikutukseen. Tämä puolestaan johtunee siitä, että TANAN pyörien väli on noin 31 cm (kumin leveys noin 35,6 cm), jolloin jyrä voi upota löysään kerrokseen.

Vertailukohteena oli vanha menetelmä: puskutraktori (Cat D4) levitti ja kumipyöräjyrä (TANA) tiivisti. Levityksestä CAT D4 suoriutui hyvin. Kun jyrä suoritti samanaikaisesti tiivistystä (tiivistysaika = levitysaika) ei tiivistyminen ollut riittävää millään kuormauskapasiteetin arvolla ( $80 - 179 \text{ m}^3/\text{td}/\text{h}$ ). Erityisesti eristyskerroksen alaosassa tiiviysarvot olivat huomattavastikin alle vaadittujen. Tiivistyskoneen työskentelystä on huomattavaa, ettei se voi työskennellä kovinkaan lähellä levityskonetta. Tällä seikalla on erityisesti kovilla pakasilla merkitystä, koska materiaalin pintakerros ehdi jäätymään.

Kustannuksia vertailtaessa voitaneen ottaa lähtökohdaksi työmailla keskimäärin käytössä oleva kuormauskapasiteetti  $K3 = 75 \text{ m}^3/\text{td}/\text{h}$ . Tällöin kustannusero on noin 0,57 mk/ $\text{m}^3/\text{td}$  TANAN hyväksi. Koska vanhalla menetelmällä ei eristyskerrosta saatu riittävän tiiviiksi, on kerrosta tiivistettävä jälkeen



päin. Tällainen jälkitiivistys tulee maksamaan noin 0,20 mk/m<sup>3</sup>rtd ( = 0,13 mk/m<sup>3</sup>itd) eli koko kustannussäästö lienee 0.70 - 0.75 mk/m<sup>3</sup>itd (= 1.10 mk/m<sup>3</sup>rtd) eristyskerroksen osalta. Kilometrin pituisella N-8/7 tiellä tämä vastaa noin 4000 - 4500 mk säästöä n. 0,50 mitd paksun eristyskerroksen rakentamisessa. Koko eristyskerroksen rakentamisessa säästö on rakennuskustannuksissa n. 12...13 %.



Kuva 11. Puskulevyllä varustettu TANA 22/115P eristyskerroksen levityksessä ja tiivistyksessä.

#### 2.2.2 Jakavan kerroksen rakentaminen

Jakavan kerroksen rakentamisessa esittää materiaalin laatu tärkeää osaa. Materiaali tulisi olla vähintään välpättyä ( 15 cm). Kokeissa kykeni TANA suoriutumaan levityksestä täysin tyydyttävästi. Tiiviystulokset näyttivät riippuvan suuresti koneen painosta. Noin 21 tn painoisena kykeni TANA tiivistämään jakavan kerroksen keskimäärin pinnassa n. 94 % ja 20 cm syvyydessä samoin n. 94 % tiiviyyteen parannetun proctor-kokeen tiiviyydestä. Vertailevassa menetelmässä saavutettiin pinnassa 93 % ja 20 cm syvyydessä 93 % tiiviysasteet.

Keskimääräiseksi kustannussäästökseksi saadaan liitteen 9 mukaan n. 0,46 mk/m<sup>3</sup>itd TANAn hyväksi. Normaalilla N-8/7 tiellä 0,50 mitd paksun jakavan kerroksen rakentamisessa.

### 2.2.3 Penkereen rakentaminen

Sellaisen penkereen, jonka materiaalin maksimiraekoko 20 cm, rakentaminen (levitys + tiivistys) voidaan tehdä TANA:lla. TANA kykenee tutkimusten mukaan levittämään K3 = 247 m<sup>3</sup>itd/h (K2 = 266 m<sup>3</sup>itd/h) vauhdilla tulevan materiaalin noin 35 - 40 cm paksuiseksi kerrokseksi. Penkereen tiiviys oli keskimäärin pinnassa D<sub>0</sub> 91 % ja - 20 cm syvyydessä D<sub>-20</sub> 90 %. Materiaalin kosteus oli varsin epäedullinen. Vertailukokeessa (puskutraktori = kumipyöräjyrä) olivat vastaavat tiiviysarvot D<sub>0</sub> 89 % ja D<sub>-20</sub> 89 %.

Jos pidetään tiiviystuloksia tasa-arvoisina, voidaan keskimääräisenä kustannussäästönä pitää n. 0,27 mk/m<sup>3</sup>itd. Tämä vastaa 2 m paksuisessa ja keskimäärin 14 m leveässä penkereessä n. 3800...4500 mk säästöä kilometriä kohden.

## 3. TIIIVISTYSKAPASITEETIT JA NOMOGRAMMIT

### 3.1 LAADINTAPERUSTEET

Kapasiteetilla ymmärretään suoritemäärää aikayksikköä kohti. Kapasiteettiin vaikuttavan ajan mukaan puhutaan erilaisista kapasiteeteista:

K1-kapas.	eli peruskapasit.;	sisältää T1-ajan
K2- "	eli menetelmäkapasit;	" T2- "
K3- "	eli käyttö- " ;	" T3- "
K4- "	eli työvaihe- " ;	" T4- "

T1-aika (perusaika) sisältää suoran tien-, liittymien-, linja-autopysäkkien-, erikoiskohteiden (esim. pysäköintialueiden) jyräyksen.

TL2-aika (menetelmän lisäaika) käsittää kääntymiset ja suunnan muutokset.

T2-aika (menetelmäaika) = T1 + TL2



TL3-aika (käytön lisäaika) sisältää kahvitauot, ruokataukojen ylitykset, myöhäiset aloitukset, aikaiset lopetukset, koneen huollot, työnjohdon ohjeiden antoja yms.

T3-aika (työmaa-aika) =  $T2 + TL3 = T1 + TL2 + TL3$

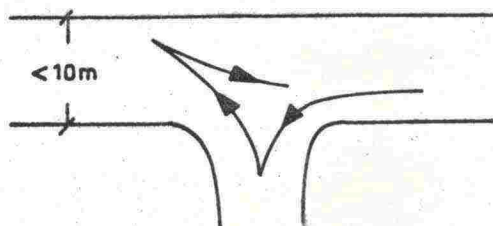
TL4-aika (työvaiheen lisäaika) käsittää ruokatunnit ja yli 1 tunnin pituiset tauot.

$T4\text{-aika (työvaihe-aika)} = T3 + TL4 = T1 + TL2 + TL3 + TL4$

Perusaika ( $T1$ ) voidaan laskea teoreettisesti:  $T1 = L/v$ , missä  $L$  = jyrättävän alueen pituus (m) ja  $v$  = jyrän nopeus (m/h).

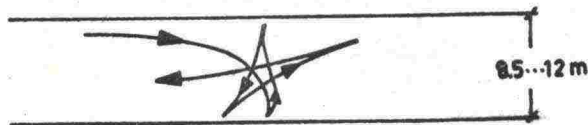
Menetelmän lisäaika ( $TL2$ ) riippuu jyrätyypistä ja käännöstä.

Keskiraskaalla täryjyrällä (5.0 - 7.5 tn), jota yleensä vetää nelivetoinen kumipyörätraktori, voidaan yli 10 m leveissä teissä tai sitä kapeimmissa teissä liittymien kohdalla suorittaa käänнос U-käännöksenä, mihin kuluu keskimäärin aikaa n. 57 emin. Jos käänнос suoritetaan 3-vaiheisena, kuvan 12 mukaisesti, kuluu tällaiseen käänنukseen aikaa noin 107 cmin.



Kuva 12. 3-vaiheinen käänнос

Mikäli käänнос suoritetaan 5-vaiheisena (kuva 13) kuluu tällaiseen käänنukseen aikaa n. 220 cm. Tämä käänنостapa vaikuttaa varsin yleiseltä kääntymistavalta, joten myöhemmin esille tulevat kapasiteetit ovat lasketut  $TL2$ -aikaa 220 cmin käyttäen.



Kuva 13. 5-vaiheinen käänнос

Kun tiivistys suoritetaan raskaalla ( 7.5 tn) täryjyrällä,



jota yleensä vetää telaketjutraktori, voidaan suorittaa käännös ns. U-käännöksenä (vaatii n. 7 m leveän alueen). Aikaa tällaiseen käännökseen kuluu n. 87 cmin.

T3- ja T4-aikoihin sen tarkemmin tässä yhteydessä puuttumatta, todettakoon lisäaikakertoimet ovat täryjyrien osalta (keskimäärin)

$$C_2 = \frac{TL3}{T3} = 0,08$$

$$C_3 = \frac{TL4}{T4} = 0,68$$

ja kumipyörien osalta (keskimäärin)

$$C_2 = \frac{TL3}{T3} = 0,07$$

$$C_3 = \frac{TL4}{T4} = 0,67$$

Tässä yhteydessä käsitellään lähemmin menetelmä- eli K2-kapasiteettia. Sen mukaan, tarkoitetaanko suoritemäärällä pinta- vai tilavuusyksikköjä, on olemassa pinta- ja massakapasiteetteja. Pintakapasiteetilla tarkoitetaan tässä sitä pintayksikkömäärää, jonka joku tiivistyskone kykenee yhdessä tunnissa tiivistämään ennalta määrättyyn tiiviYTEEN (kantavuuteen). Pintakapasiteetti voidaan laskea kaavasta

$$Y = \frac{1}{h} \times \frac{L \times (B-P)}{T1 + \sum_i TLi}, \quad (1)$$

missä Y = pintakapasiteetti (m<sup>2</sup>/L)

L = jyrättävän alueen pituus (m)

B = jyrän valssin leveys (m)

h = jyräyskertamäärä (kpl)

T1 = perusaika (h)

i. TLi = lisäaikojen summa (h)

Massakapasiteetilla tarkoitetaan tässä sitä tilavuusyksikkömäärää, jonka jyrä kykenee tiivistämään riittävän tiiviiksi yhdessä tunnissa. Se voidaan laskea kaavasta

$$Q = \frac{H}{h} \times \frac{L \times (B-P)}{T1 + TL1}, \quad (2)$$

missä Q = massakapasiteetti (m<sup>3</sup>rtr/h)

H = tiivistettävän kerroksen paksuus (m)

Kaavoissa esiintyvistä lisäajasta TL1 riippuu, mikä kapasiteetti (K1-, K2-, K3- tai K4-kapasiteetti) kulloinkin on kyseessä. Kun kyseessä on menetelmäkapasiteetti, on aikatermi  $T1 + TL2 = L/v + TL2$ .

Kumipyöräjyrällä saadaan K2-kapasiteetiksi, edellyttämällä, että suunnan muutos kestää 10 cmin, B = 216 cm ja P = 20 cm.

$$K2 = \frac{1}{h} \times \frac{L \times 1.96}{\frac{L}{v} + \frac{10}{6000}} \quad (3)$$

Täryjyrällä saadaan K2-kapasiteetiksi

$$(\text{Lokomo AT82}) K2 = \frac{1}{h} \times \frac{L \times 1.86}{\frac{L}{v} + \frac{87}{6000}} \quad (4)$$

missä TL2 = 87 cmin, B = 200 cm ja P = 15 cm.

$$\text{ja } (\text{Lokomo AT52}) K2 = \frac{1}{h} \times \frac{L \times 1.75}{\frac{L}{v} + \frac{220}{6000}} \quad (5)$$

missä TL2 = 220 cmin, B = 190 cm ja P = 15 cm.

Nomogrammeissa 1, 2 ja 3 ilmenevät vastaavat arvot graafisesti esitettyinä kahdella eri nopeuden arvolla matkan funktiona.

Haluttaessa arvioida K3- ja K4-kapasiteetteja, voidaan ne laskea K2-kapasiteeteista seuraavasti:

$$K3 = (1.00-C2) \times K2 = a_2 \times K2 \quad (6)$$

$$K4 = (1.00-C3) \times K3 = (1.00-C2) \times (1.00-C3) \times$$

$$K2 = a_2 \times a_3 \times K2 \quad (7)$$

Käyttämällä em. lisäaikakertoimia saadaan täryjyrillä

$$K3 = 0.92 \times K2$$

$$K4 = 0.32 \times K3 = 0.29 \times K2$$

ja kumipyöräajyrillä

$$K3 = 0.93 K2$$

$$K4 = 0.33 K3 = 0.31 \times K2$$

Lisäaikoihin sivältyvät vapaavuorot.

Yksikkökustannus saadaan jakamalla yksikkötuntihinta kapasiteetin arvolla.

### 3.2 KASTELU

Kastelun merkitys materiaalin tiivistyksessä on huomattavan suuri. Kastelu on kuitenkin varsin kallista, joten turhaa kastelua tulisi välttää. Teoreettisesti kasteluun käytettävä vesimäärä voidaan laskea sillä olettamuksella, ettei materiaali sido itseensä enempää vettä, kuin mitä sen kyllästysraja osoittaa. Näin saadaan kerrosten kastelemiseksi kaava, jonka ilmoittamalla vesimäärällä on mahdollisuus saada vesipitoisuus yli optimimäärän.

$$Q = 10 \cdot i \cdot (W_{ky} - W_{kl}) \cdot k \cdot d \quad (l/m^2) \quad (8)$$

missä  $Q$  = kasteluun käytettävä vesimäärä ( $l/m^2$ )  
 $W_{ky}$  = materiaalin kyllästysraja (%)  
 $W_{kl}$  = " kosteus ennen kastelua  
 $k$  = " kuivatilavuuspaino ( $kg/dm^3$ )  
 $d$  = kerrospaksuus (m)  
 $i$  = kerros

Kastelukustannukset riippuvat etäisyydestä vedenottamoon seuraavasti (v. 1967 kuorma-autoilijain ansiotason tutkimustoimikunnan mietintö)

kuljetuksen etäisyys km	yksikköhinta mk/m <sup>3</sup>
0 - 2	1.24
2 - 3	1.48
3 - 4	1.70
4 - 5	1.93
5 - 6	2.16

Taulukko 1. Yksikköhinnan riippuvuus etäisyydestä vedenottamoon



Vedenajokustannukset tulevat tällöin olemaan (taulukko 2) mukaisia

lisättävä vesimäärä l/m <sup>2</sup>	kastelukust.(mk/m <sup>2</sup> ) ajomatk. ollessa(km)				
	0 - 2	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6
40	0.050	0.059	0.068	0.077	0.086
60	0.074	0.089	0.102	0.166	0.130
80	0.099	0.118	0.136	0.154	0.173
100	0.124	0.148	0.170	0.193	0.216
120	0.149	0.178	0.202	0.231	0.259
140	0.173	0.207	0.238	0.270	0.320
:	-	-	-	-	-
400	0.496	0.592	0.680	0.772	0.865

Taulukko 3. Kastelukustannukset

(Vrt. kuvaa , liite 4).

Esimerkki:

Suoritetaan jakavan kerroksen kastelu. Jakavasta kerroksesta tiedetään seuraavaa:  $H = 35$  cm,  $k = 2.04$  kg/dm<sup>3</sup>,  $W_{ky} = 11.2$  %,  $W_{kl} = 2.1$  %,  $W_{opt.} = 6.3$  % ja ajomatka on 5 - 6 km.

Lisättävä vesimäärä:  $Q = 10 \times (11.2 - 2.1) \times 2.04 \times 0.35 = 65$  l/m<sup>2</sup> (= 185,5 l/m<sup>3</sup>rtr)

Kastelukustannukset ovat tällöin noin 0.15 mk/m<sup>2</sup> (= 0.41 mk/m<sup>3</sup>rtr)

### 3.3 TIIVISTYSKUSTANNUKSET

Kun tarkastellaan K2-kapasiteettiarvoja (liitteet 1, 2 ja 3), niin voitaneen olettaa, ettei kapasiteetti kasva merkitsevästi kumipyöräjyrillä 200 m:n ja täryjyrillä 400 m:n jyräysmatkan jälkeen. Tällä olettamuksella on saatu liitteiden 5, 6 ja 7 diagrammien yläosat. Koska K2-kapasiteetti ilmastaan joko > m<sup>2</sup>/h tai m<sup>3</sup>rtr/h voidaan ne muuttaa suoraan joko mk/m<sup>2</sup> tai mk/m<sup>3</sup>rtr ottamalla huomioon jyrien tuntitaksat. Diagrammien neljännessä neljänneksessä ovat kastelukustannukset (mk/m<sup>3</sup>rtr). Kun jyräyskustannuksiin lisätään kastelun aiheuttamat kustan-

nukset, saadaan tiivistyskustannuksiksi po. diagrammien 3:nnessa neljänneksessä olevat arvot (käyrät).

Kustannuksissa on käytetty 1.9.1970 enimmäisohjevuokrahintoja.

Edellä mainituissa diagrammeissa ilmenevät tiivistyskustannukset tilavuusyksikköä kohti. Koska usein ilmaistaan tiivistyskustannukset myös pintayksikköä kohti, voidaan ne tässä yhteydessä laskea kaavasta:

$$K^1 = \frac{k}{Y} + v \quad (9)$$

missä

$K^1$  = tiivistyskustannukset (mk/m<sup>2</sup>)

$k$  = koneen tuntihinta (mk/h)

$Y$  = pintakapasiteetti (m<sup>2</sup>/h)

$v$  = kastelukustannukset (mk/m<sup>2</sup>)

$Y$  voidaan määrittää likimäärin olettamalla, että jyräysmatka kumipyöräjyrillä on yli 200 m ja täryjyrillä yli 400 m taulukon 4 mukaan.  $v$  voidaan määrittää graafisesti liitteen 4 mukaan.

Jyrä	$Y$ (m <sup>2</sup> /h)	nopeus (km/h)
AP220	18800/n	10
"	9600/n	5
AT82	9400/n	6
"	5100/n	3
AT52	7000/n	6
"	4200/n	3

Taulukko 4. Pintakapasiteetin arvioiminen

Taulukossa esiintyvä suure  $n$  tarkoittaa jyräyskertamäärää (kpl).

Esim.

Tiivistetään jakava kerros, josta tiedetään seuraavaa:  $H = 35$  cm,  $L = 400$  m,  $k = 2.04$  kg/dm<sup>3</sup>,  $W_{opt} = 6.3$  %,  $W_{kl} = 2.1$  %,  $W_{ky} = 11.2$  %, ajomatka 5 - 6 km, materiaalin kivisyys noin

30 - 40 %.

Käytettäessä täryjyrää AT82, voidaan kerros saada vaadittavaan tiiviYTEEN 10 jyräyskerralla käyttämällä jyräysnopeutena 3.0 km/h. Tällöin saadaan liitteestä 6:  $Y = 510 \text{ mk}^2/\text{h}$ ,  $Q = 180 \text{ m}^3\text{rtr}/\text{h} = 0,28 \text{ mk}/\text{m}^3\text{rtr}$ .

Edellä olevan kasteluesimerkin mukaisesti saadaan tarvittavaksi vesimääräksi  $185,5 \text{ l}/\text{m}^3\text{rtr} = 0,41 \text{ mk}/\text{m}^3\text{rtr}$ . Tiivistyskustannukset ovat  $K = 0,69 \text{ mk}/\text{m}^3\text{rtr}$ ,  $K^1 = 49/180 + 0,15 = 0,25 \text{ mk}/\text{m}^2$ .

Jäs käytetään jyräysnopeutena 6,0 km/h ja jakava kerros tiivistyisi 15 jyräyskerralla saadaan edellistä vastaavasti:

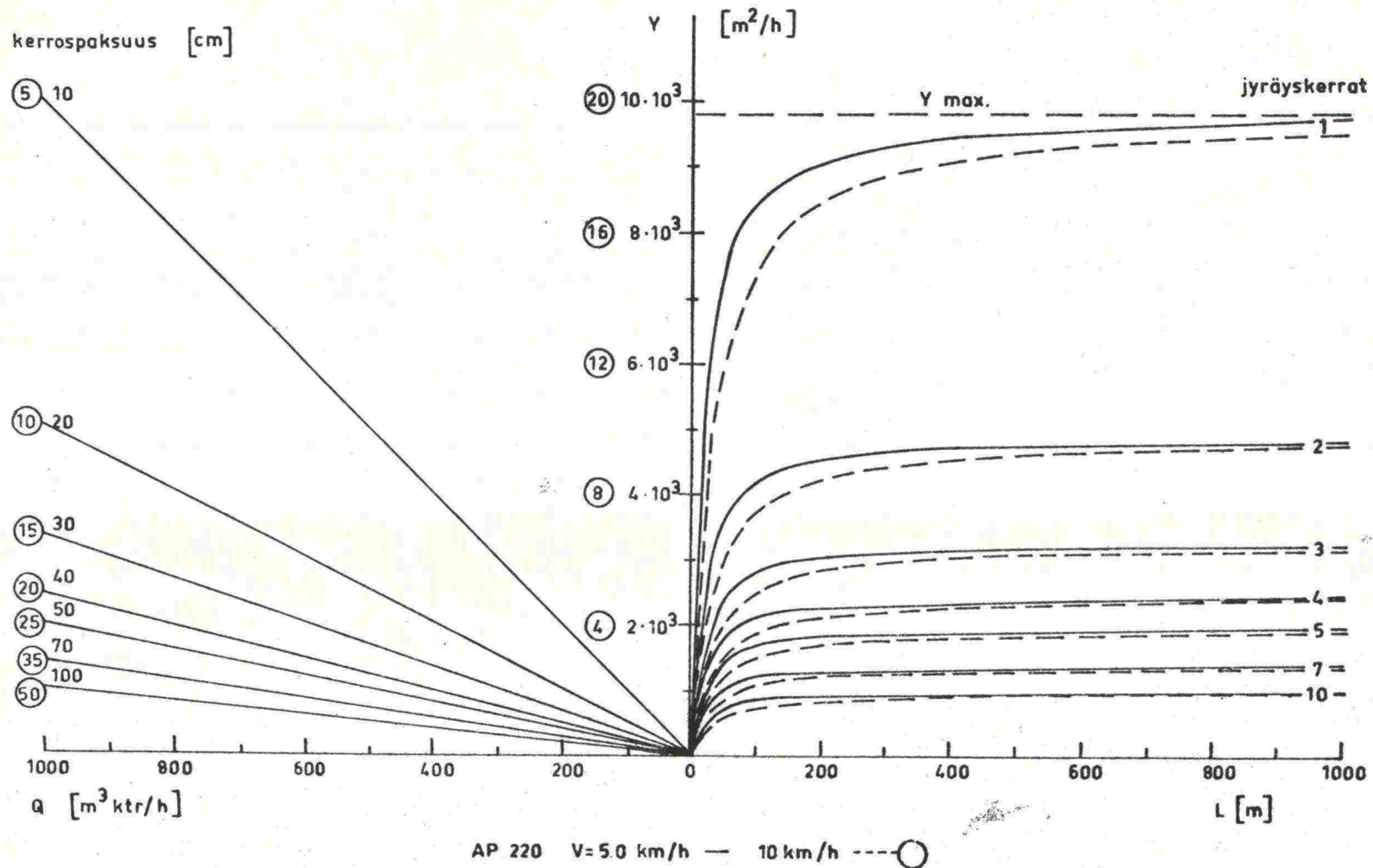
$$Y = 626 \text{ m}^2/\text{h}$$

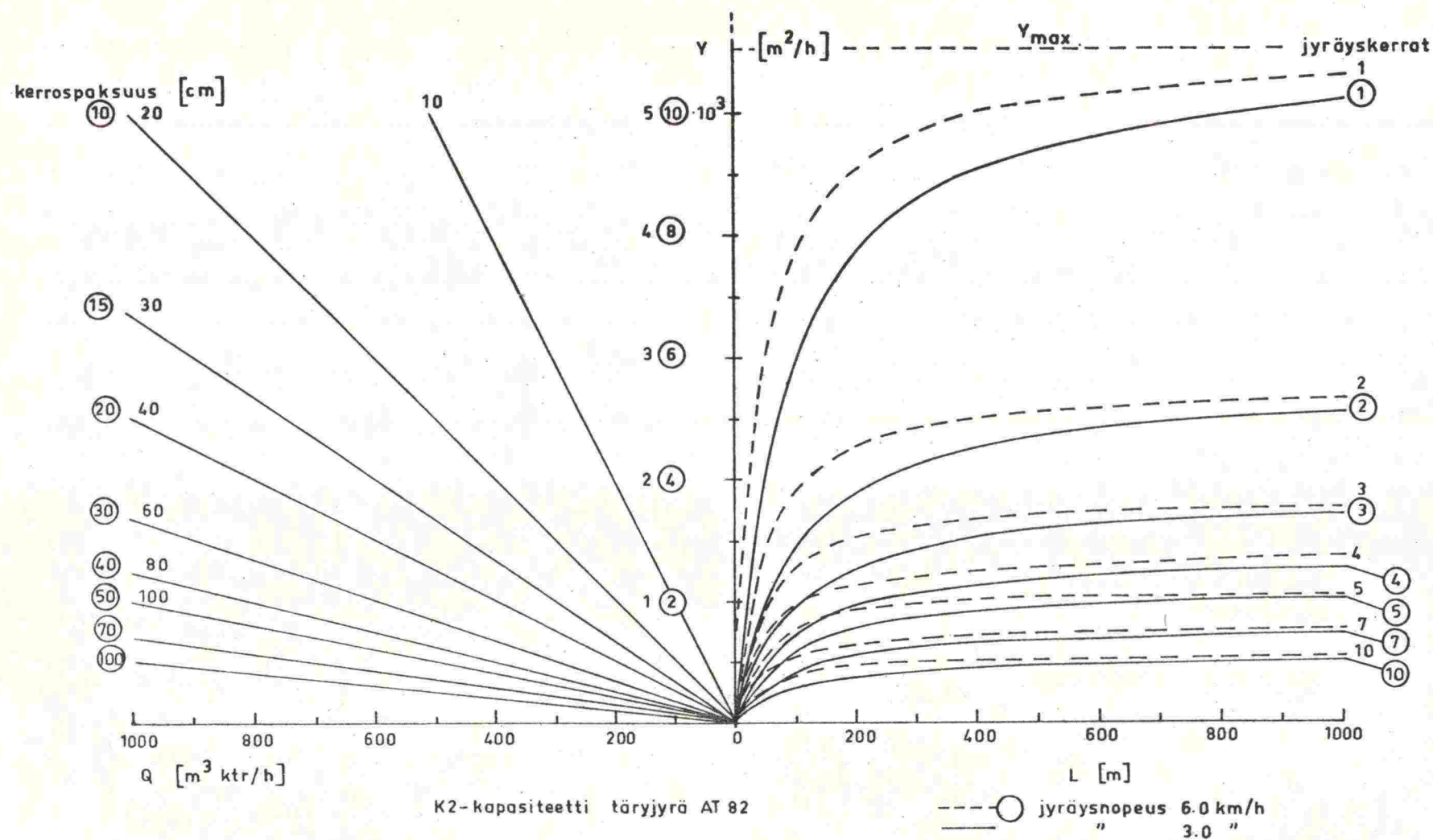
$$Q = 220 \text{ m}^3\text{rtr}/\text{h}$$

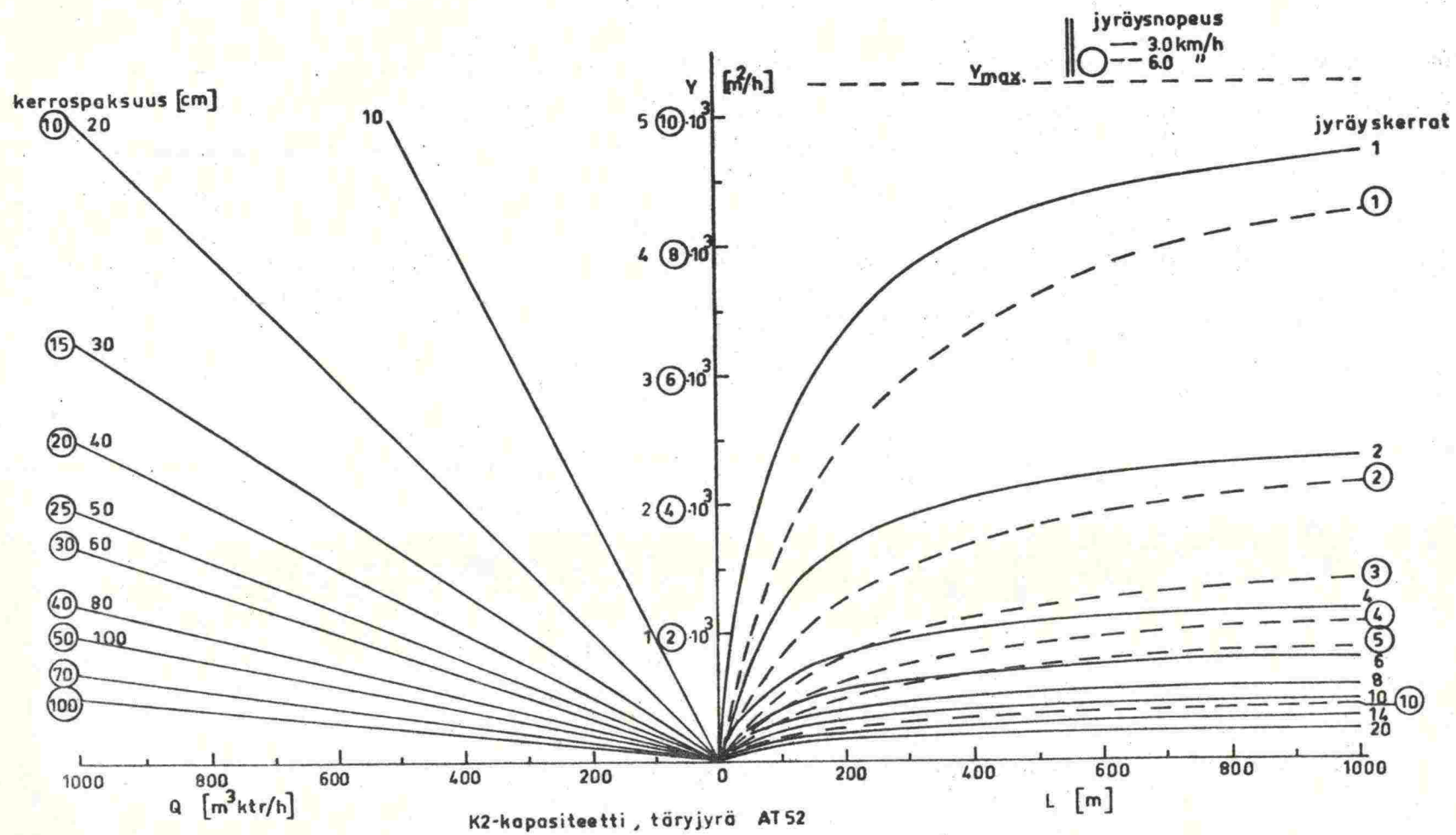
$$K = 0,22 + 0,41 = 0,63 \text{ mk}/\text{m}^3\text{rtr}$$

$$K^1 = 0,08 + 0,15 = 0,23 \text{ mk}/\text{m}^2$$



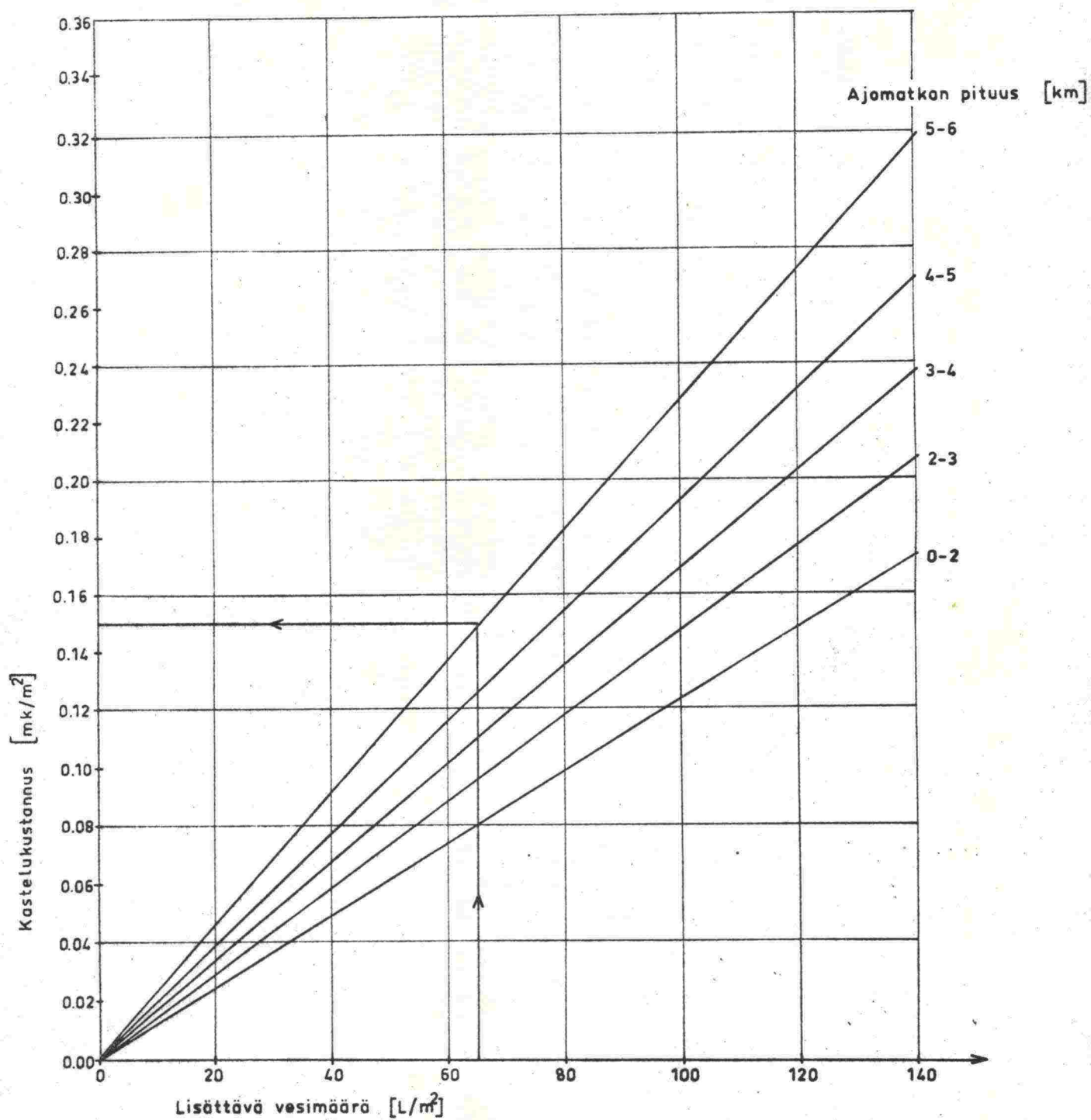


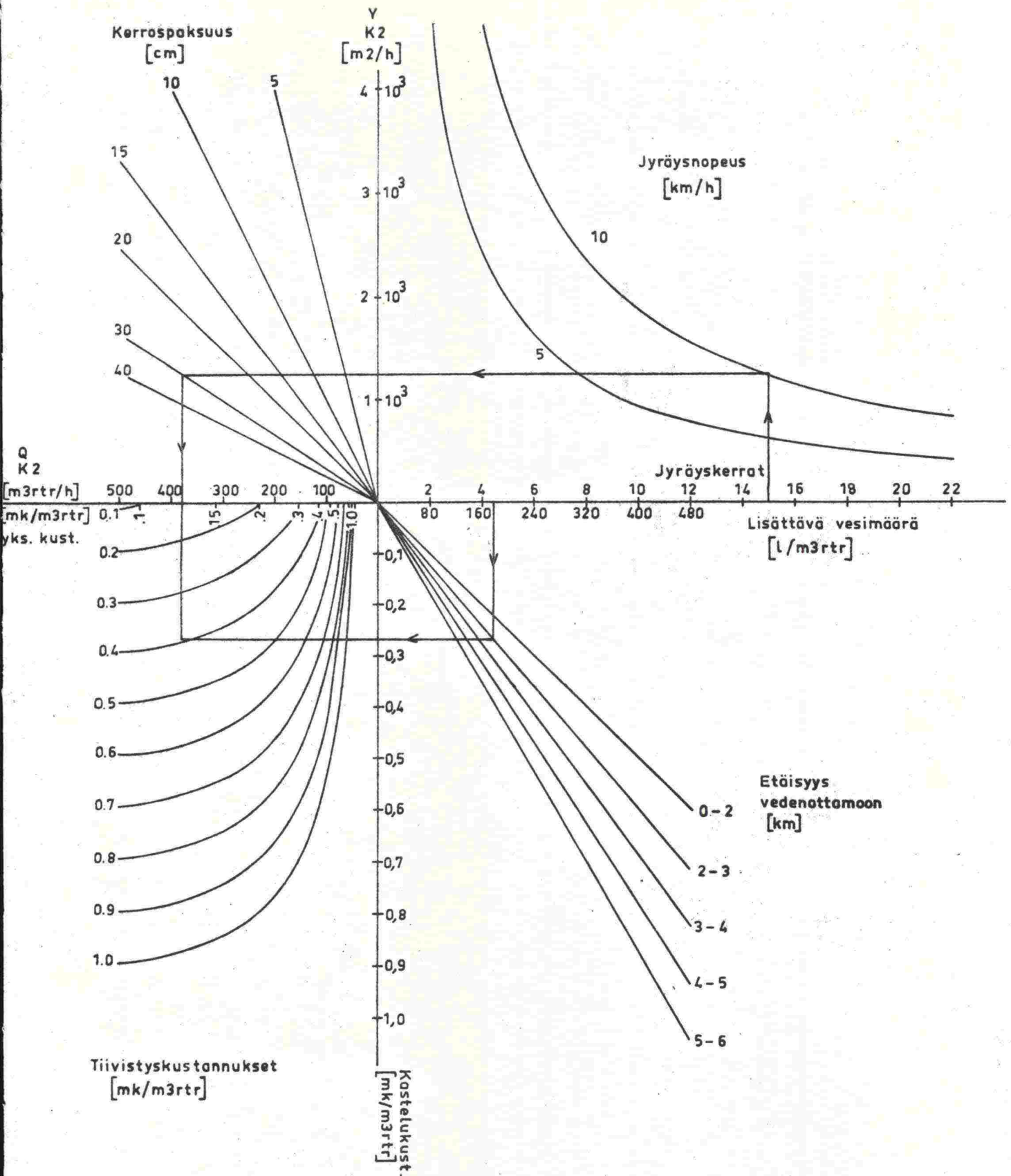




LIITE 3.  
K2-kapasiteetti  
JT05:lle



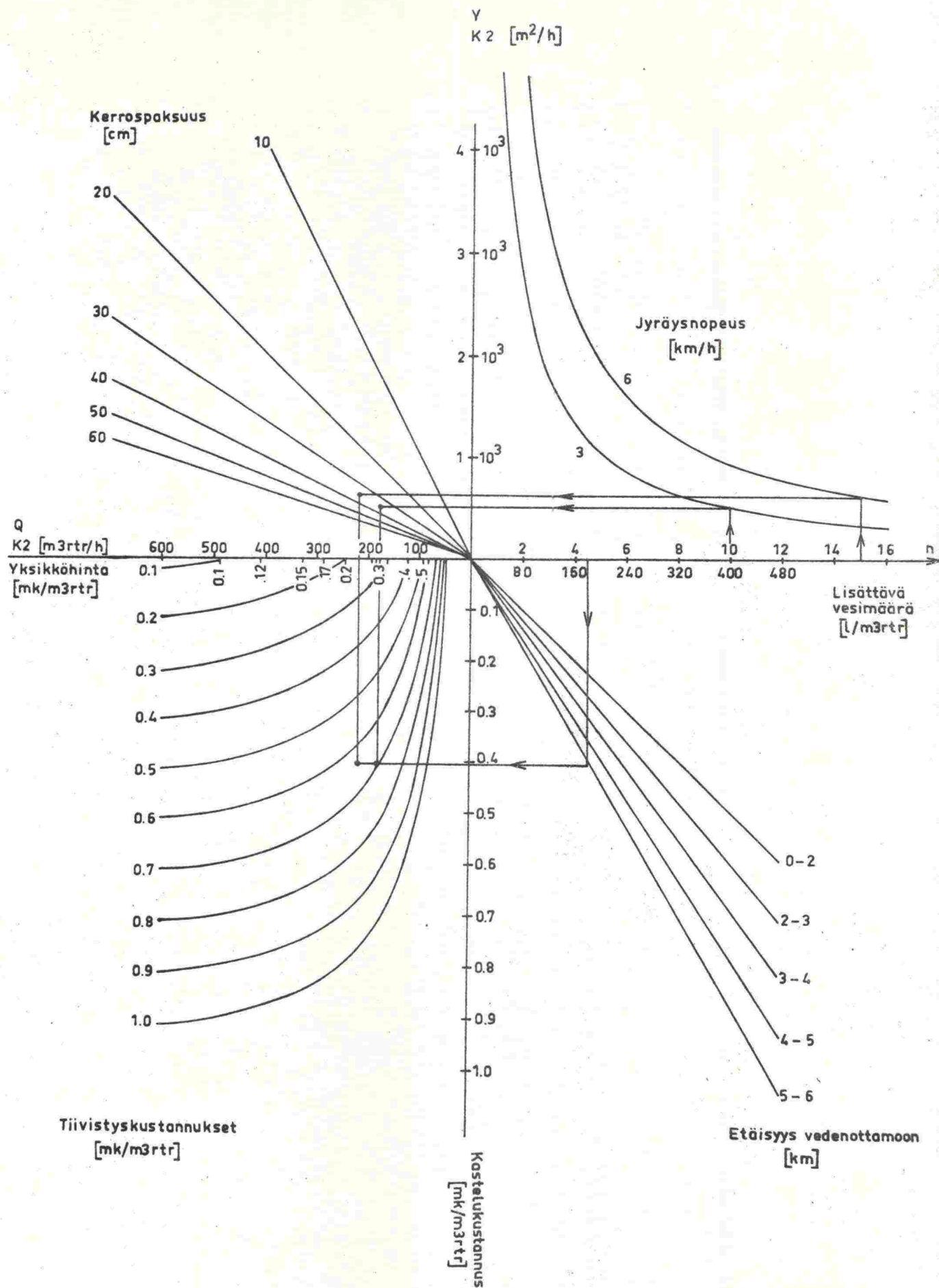




Kumipyöräjäyrä LOKOMO AP 220

K2-kapasiteetit

Kastelu-, jyräys- ja tiivistyskustannukset

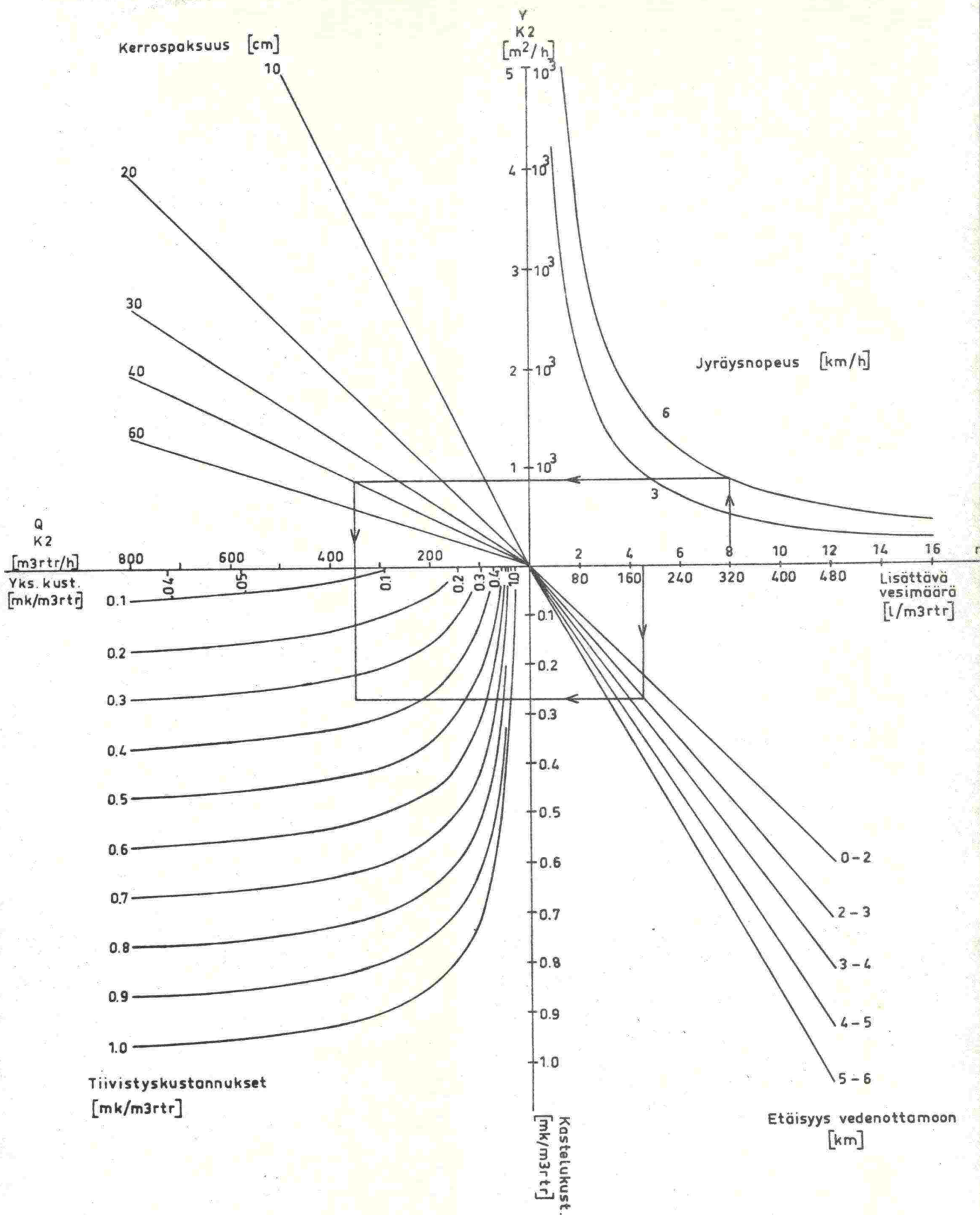


Täryjyrä LOKOMO AT 82

K2-kapasiteetit

Kastelu-, jyräys- ja tiivistyskustannukset

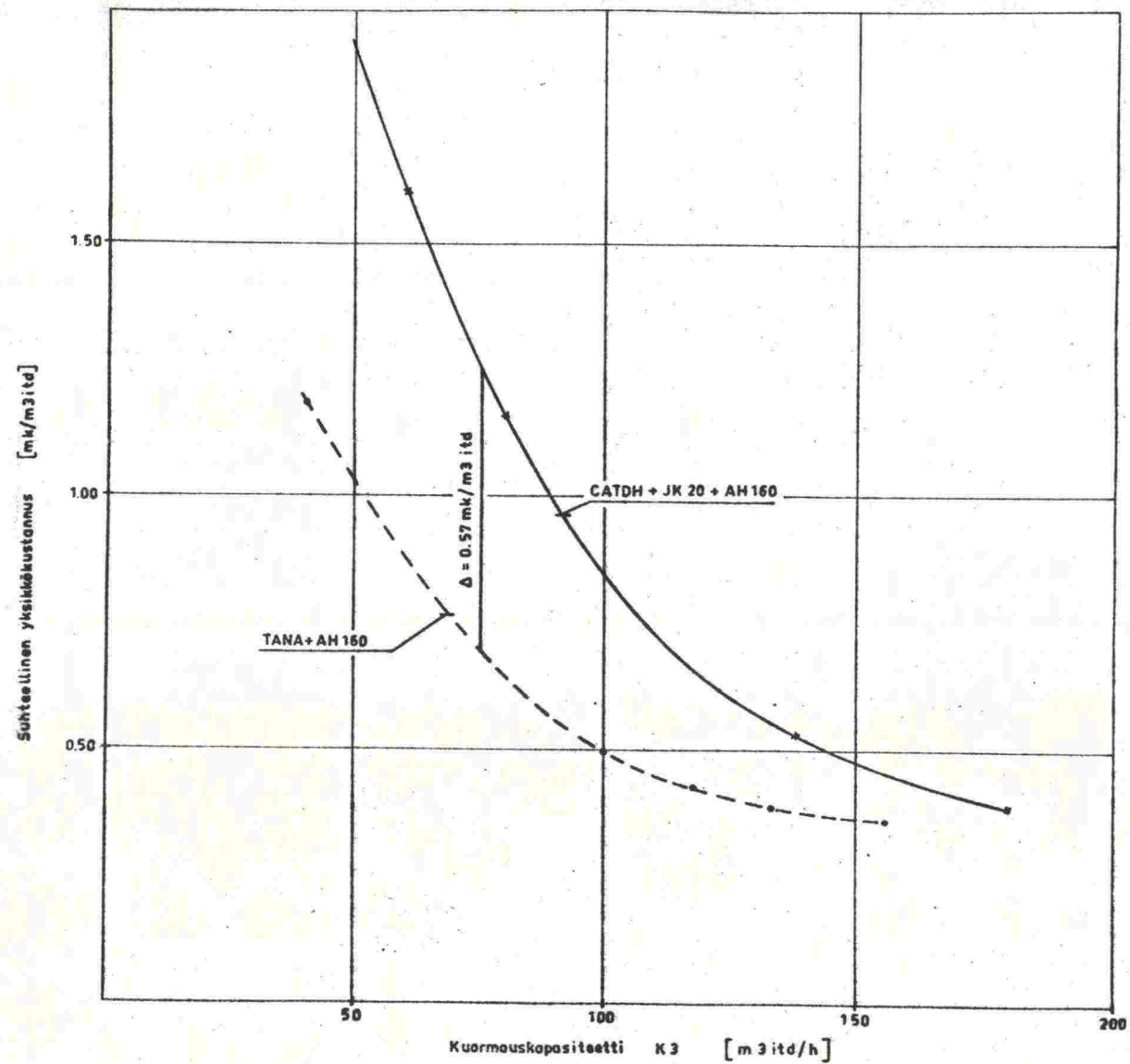


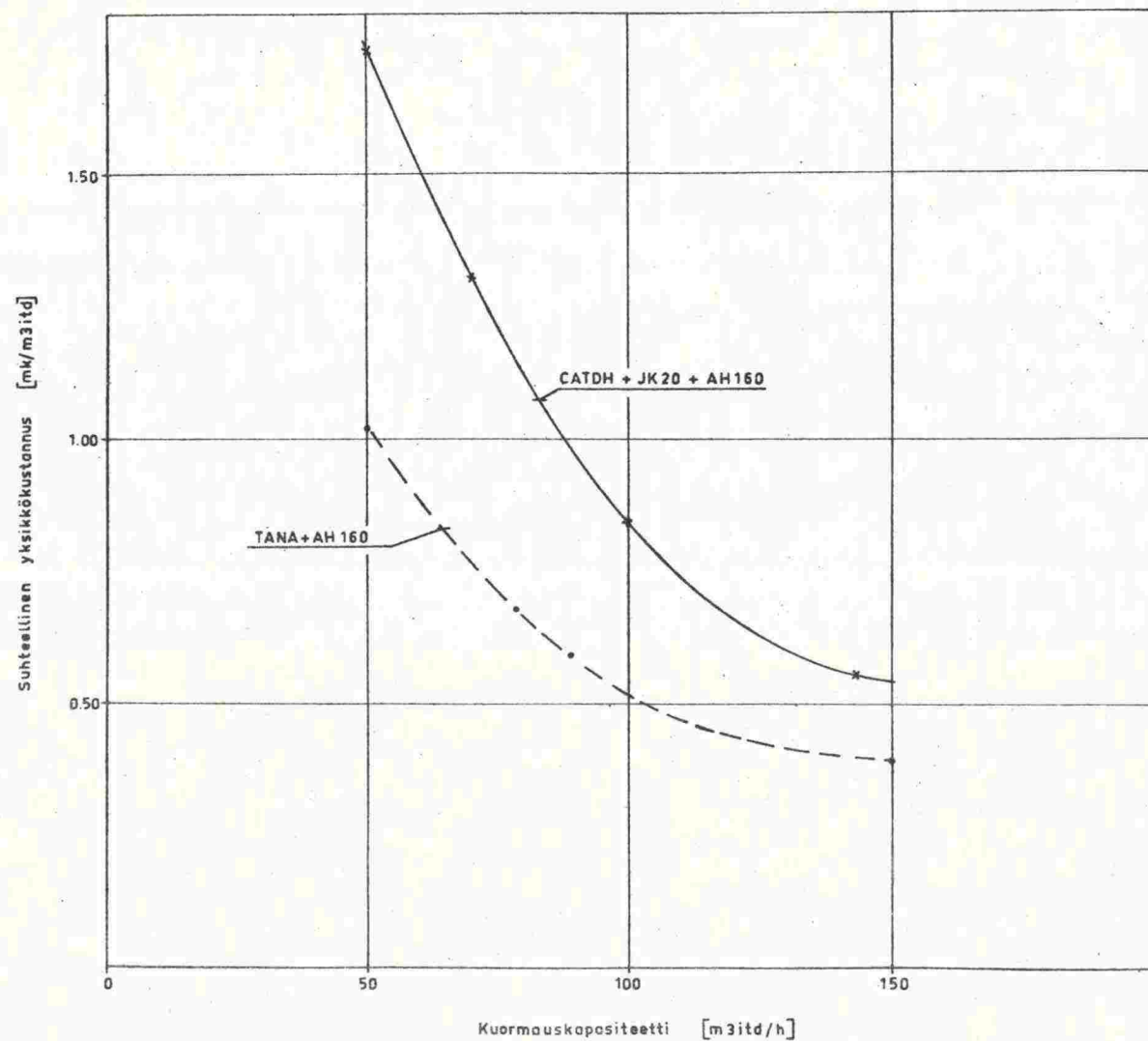


Täryjyvä LOKOMO AT 52

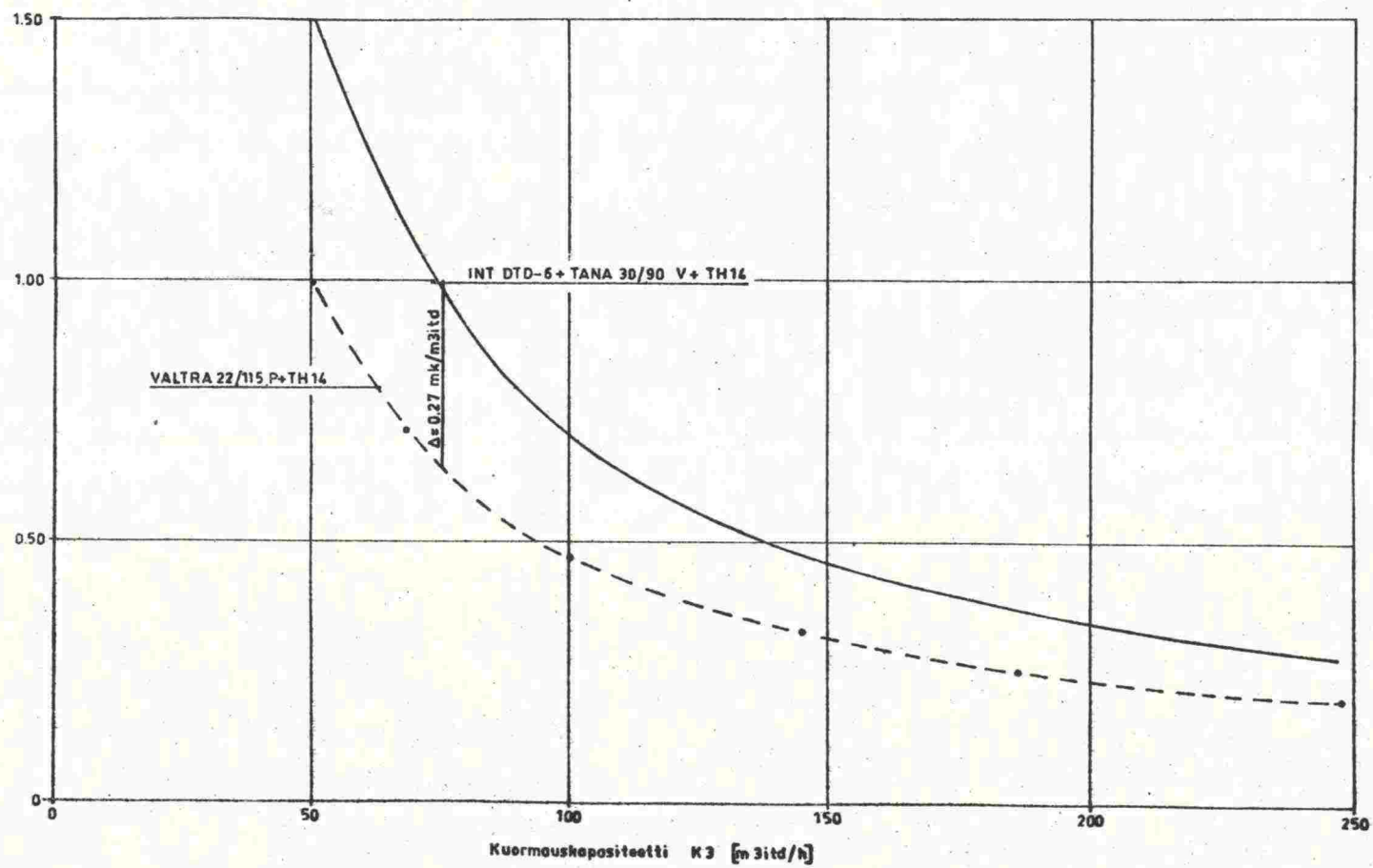
K2-kapasiteetit

Kastelu-, jyräys- ja tiivistyskustannukset









LIITE 10. Penkereen teko

Dipl.ins. I. Rahiala

VI      T I I V I S T Ä M I S T Y Ö N   J Ä R J E S -  
T E L Y   J A   V A L V O N T A

## VI TIIVISTÄMISTYÖN JÄRJESTELY JA VALVONTA

### JOHDANTO

Huolimatta siitä, että tiivistämistapahtumaan liittyvä perusteoria on jo kauan ollut tunnettua ja tiivistämisen merkitys kaikissa maarakennustöissä on tunnustettu, tapahtuu tiivistäminen tienrakennustyömailla edelleen puutteellisesti ja usein vailla asiallista valvontaa. Tiivistämistä suoritetaan siinä sivussa vanhaan totuttuun tapaan syventymättä lähemmin työn tarkoituksenmukaisuuteen.

Tämä on käynyt selvästi ilmi, kun viime vuosina meilläkin toteutettu tien rakennekerrosten laaduntarkkailu on antanut mahdollisuuden tarkastella kentällä saavutettuja tuloksia. Huomattavasta tiivistämistyöstä huolimatta on rakenteen tiiviys ja kantavuus saattanut jäädä heikoksi tai hyvä tulos on saattanut vaatia kohtuuttoman suuren työpanoksen. Pelkkä tuloskontrolli ei siten riitä, on tehostettava itse tiivistämistyön valvontaa ja kiinnitettävä huomiota ennalta tapahtuvaan suunnitteluun.

### 1. TIIVISTÄMISTYÖN SUUNNITTELU

#### 1.1 SUUNNITTELUN TARKOITUS

Tiivistäminen sisältyy osana työmaan työnsuunnitteluun, jolla selvitetään työn aikataulu, kustannukset ja toi-



mintavälineet, Tiivistämisen osalta työnsuunnittelussa tehtävät ratkaisut ovat yleensä ylimalkaisia eivätkä takaa sitä, että eri rakennekerrokset ja eri tienkohdat saisivat todellista tiivistämistarvetta vastaavan käsittelyn. Yksityiskohtaisten ohjeitten puuttuessa suunnittelu on perustunut sormituntumaan ja työnjohdon henkilökohtaiseen kokemukseen. Nytemmin on ohjeita tarkennettu ja standardien avulla päästäänkin entistä johdonmukaisempaan suunnitteluun. Kenttätö sisältää kuitenkin aina niin paljon muuttuvia tekijöitä, että yleispätevien työmenetelmäohjeiden antaminen on mahdollonta. Sen vuoksi tiivistämistyön suunnittelun olisi oltava niin yksityiskohtaista, että pengerr penkereeltä, leikkaus leikkaukselta, kerros kerrokselta työkohteittain harkitaan tiivistämiseen vaikuttavien tekijöiden yhteisvaikutus ja tehdään standardien tai muun tietomateriaalin pohjalta päätelmät tiivistämistarpeesta. Ja vasta tämän jälkeen kootaan paloista kokonaisuus, jonka tulee järkevästi niveltä työmaan työsuunnitelmaan. Hyvänkin suunnittelun jälkeen saatetaan kenttätössä kokea ikäviä yllätyksiä, mutta perusteellisesti harkitun suunnitelman pohjalta on kuitenkin helpompi hallita tilannetta muuttuneissakin olosuhteissa.

## 1.2 SUUNNITTELUUN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Seuraavassa tarkastellaan eräitä kenttätössä esiin tulevia tekijöitä, joiden huomioimatta jättäminen saattaa johtaa liian ylimalkaiseen suunnitteluun ja ainakin paikallisesti epätydyttäviin tuloksiin. Kaikkien mahdollisten tekijöiden luetteleminen ei ole mahdollista eikä tarkoituksaan. Asian tyhjentävä selvittäminen vaatii vielä pitkäaikaista ja laajaa tutkimustyötä sekä tutkimuslaitoksissa että kenttäolosuhteissa.

### 1.2.1 P e r u s m a a n v a i h t e l u t

Suomalainen maasto on usein pienipiirteistä, sekä maanpinnan korkeusvaihtelut että maaperän kantavuusvaihtelut ovat voimakkaita ja jyrkkiä. Tieltä, joka leikkausten ja pengerrysten avulla rakennetaan tähän maastoon, edellytetään muun ohella yhtenäistä tietyn minimitasen ylittävää kantavuutta. Kun maapohjaa valmistellaan pengeralustaksi tai alusrakenteeksi, on erot sen luonnollisessa kantavuudessa ja tiiviydessä huomioitava ja tiivistämistoimenpiteet suunnattava sen mukaisesti. Tämä tietenkin edellyttää maaperätutkimusten täydentämistä niin, että ominaisuudet tulevat selvitettyä riittävässä määrin. Tiiviille pohjamaalle on tarpeetonta uhrata kustannuksia tiivistämiseen, mikä tällöin saattaa vain huonontaa lopputulosta, toimenpiteet on suunnattava löyhään tienkohtaan, jonka lujuutta voidaan tiivistämällä ehkä merkittävästikin parantaa. Raskaita täryjyriä ei ole syytä ohjata myöskään pehmeikköalueille, missä liian voimakas tiivistäminen saattaa heikentää pohjamaan lujuutta ja aiheuttaa jopa sortumavaaran. Pohjamaan tiivistäminen on kuin perustuksen rakentamista tien rakennekerroksille, sen vuoksi sen tarpeellisuutta on korostettava, mutta samalla on kiinnitettävä huomiota työtavan valintaan niin, että perusmaan paikalliset vaihtelut huomioidaan.

### 1.2.2 K e r r o s m a t e r i a a l i n j a k e r r o k s e n p a k s u u d e n v a i h - t e l u t

Mitä kauemmas perusmaasta penkereen pinta nousee sitä vähemmän perusmaa vaikuttaa tiivistämistavan valintaan. Sen sijaan vaihtelut pengermateriaalin laadussa aiheuttavat sen, että kerralla tiivistettävä kerrospaksuus, tiivistyskalusto ja jyräyskerrat on tutkittava työkohte työ-



kohteelta erikseen. Joka tapauksessa riittävän raskaan jyrän tulisi koko ajan kuulua itseoikeutettuna penkeen rakentamistyöhön siinä kuin "penkkamieskin".

Päällysrakennemateriaaleista lienee ongelmallisoin eristys-  
hiekkakäyry, sillä lajittuneimmat hiekat ovat usein vaikeasti tiivistettäviä ainakin sillä kalustolla, jota päällysrakennejyräyksiin on totuttu käyttämään. Jyrän liikkumisen löyhässä hiekassa saattaa osoittautua hankalaksi tai mahdottomaksi. Toisaalta vähäinenkin suhteistuneisuus rakeisuuskäyrässä saattaa helpottaa tiivistämistä huomattavasti. Tämän takia eristyskerrokseen käytettävä materiaali on syytä tutkia tiivistämisominaisuuksiltaan etukäteen esim. koejyräyksen avulla. Jakavan kerroksen materiaali on yleensä helposti tiivistettävissä, mikäli rakeisuuskäyrä on ohjealueen rajakäyrien suuntainen. Mutta materiaalin hiekkaisuus, suuri kivisyysprosentti tai muuten epäedullinen rakeisuuskäyrän muoto saattavat aiheuttaa erottumista ja pehmenemistä jyrästyön aikana. Tutkimalla materiaalia etukäteen voidaan näitä haittoja vähentää esim. valitsemalla työhön kumipyöräjyrä ja välttämällä voimakasta kastelua jyrästyön aikana. Eristys- ja jakavan kerroksen yhteispaksuus on yleensä niin suuri, ettei molempien tiivistäminen jakavan kerroksen päältä tuota tyydyttävää tulosta. Niinpä kummankin kerroksen osuutta ja rakentamistapaa valittaessa on syytä huomioida myös tiivistämismahdollisuudet.

Tien rakennekerroksista yleensä vain kantava kerros on yhtenäinen koko työmaan pituudelta. Kantavalle kerrokselle voidaankin sen paksuus ja materiaalin rakeisuus huomioiden valita standardeja käyttäen tiivistämistapa, jota sitten noudatetaan koko työmaalla.



### 1.2.3 S ä ä t i l a j a k o s t e u s - s u h t e e t

Vesipitoisuudella on oleellinen merkitys maa-aineisten tiivistymisominaisuuksille. Jos materiaalissa on vettä liian paljon, käy tiivistäminen mahdottomaksi, jos vettä on liian vähän, ei tiivistäminen ole tehokasta eikä tyydyttäviä tuloksia saavuteta. Tienrakennustyömailla runsaasti hienoaainesta sisältävät pengermateriaalit ovat yleensä liian märkiä silloin kun pitäisi tiivistää ja päällysrakennemateriaalit taas ovat kesällä liian kuivia. Voimakasta vetokalustoa käyttäen voitaneen tienkereeseen kelpuutettu materiaali ylikosteanakin tiivistää raskasta kalustoa käyttäen aina, milloin pengermassojen ajokin on mahdollista. Samoin voidaan liian kuivaa päällysrakennemateriaalia kastella ennen tiivistämistä. Kastelu on kuitenkin kallista ja ylimääräinen vesi aiheuttaa hankaluuksia, sen vuoksi tulisi tietoisesti pyrkiä ajoittamaan työt niin, että vesipitoisuus luonnostaan olisi mahdollisimman lähellä optimikosteutta. Päällysrakennemassojen kohdalla tämä merkitsee, että tiivistämisen tulisi tapahtua kerroksen rakentamisen yhteydessä ennenkuin materiaali on ehtinyt kuivua. Ja jos kastelua jossakin tienkohdassa tarvitaan, on veden kuljetusmatka saatava mahdollisimman lyhyeksi. Kastelu tulisi suorittaa illalla tai yöllä, jolloin haihtuminen on vähäisintä, jotta veden lisäyksestä todella olisi apua jyräyksessä.

Kylmänä vuodenaikana on tiivistäminen suoritettava ennenkuin rakenteeseen tuotu materiaali on ehtinyt jäätyä. Lumi ja jää on mahdollisimman tarkoin poistettava kerrosten välistä. Ja työskentely tulisi etenkin routivia pengermassoja käsiteltäessä suorittaa mahdollisimman lyhyissä erissä niin, että penkereen routaantuminen jäisi mahdollisimman vähäiseksi.

#### 1.2.4 Rakentamisaikataulu

Koko työn aikataulu määrää yleensä ne olosuhteet, missä tiivistäminen on suoritettava, eikä tällöin voida välttyä siltä, että jonkin kerroksen tai tienkohdan tiivistäminen joudutaan suorittamaan epäedullisissa olosuhteissa. Hyvään lopputulokseen voidaan kuitenkin päästä huomioimalla tilanne etukäteen jyräyskalustoa ja -tapaa valittaessa. Toisaalta on pidettävä välttämättömänä, että rakentamisaikataulua laadittaessa otetaan tiivistämismahdollisuudet yhtenä tekijänä huomioon, niin, ettei tehokasta tiivistämistä vaativia työvaiheita sijoiteta ajankohtaan, jolloin tiivistäminen on mahdotonta.

Samassakin rakentamishankkeessa muodostuu eri työkohteitten aikataulu usein erilaiseksi. Useammalle vuodelle ajoitetussa työssä voidaan esimerkiksi penkereiden tiivistäminen suorittaa osaksi pengermassojen ajon yhteydessä talvella ja osaksi omana työvaiheenaan syyskesällä lähes ihanteellisissa kosteusolosuhteissa. Mutta jokainen hanke sisältää yleisaikataulusta riippumatta kohtia, joissa ei ole valinnan varaa, vaan ne on liikennejärjestelyjen tms. syiden vuoksi rakennettava yhtäjaksoisesti ja usein aivan työn loppuvaiheessa - valmiiksi asti. Tällöin myös tiivistämisessä on pyrittävä suoraan lopullisiin tuloksiin ja tiivistämismenetelmä on valittava sen mukaisesti.

#### 1.3 SUUNNITELMAN SISÄLTÖ

Kenttäolosuhteiden tuntemukseen, käytännön kokemukseen, standardeihin ja teoreettisiin tosiasioihin perustuen laaditaan tiivistämistyöstä suunnitelma, jossa tulee ratkaista kalustovalinnat, ajoittaa työ, laskea kustannukset ja antaa lähemmät kaluston käyttöä ja työtapaa koskevat ohjeet.

### 1.3.1 Kaluston valinta

Kaluston valinnan tulee perustua työn yleisaikatauluun, kapasiteettistandardeihin sekä edellä kuvattuun, työkohteittain tapahtuvaan todellista tiivistämistarvetta selvittävään tarkasteluun. Kaluston tulisi olla riittävän monipuolinen, niin, että tien eri kohdissa voitaisiin tiivistäminen tarvittaessa suorittaa eri tavoilla. Tässä mielessä täydentävät esimerkiksi raskas täryjyrä ja raskas kumipyöräjyrä mainiosti toisiaan pengerrysvaiheessa tai päällysrakenteen alaosaa tehtäessä; vastaavat kevyemmän painoluokan koneet sopivat hyvin yhteen kantavaa kerrosta rakennettaessa.

### 1.3.2 Kaluston käyttöohjeet

Kaluston käyttöohjeena tulee suunnitelmassa antaa tiedot jyräsykertamääristä, suositeltavista jyränopeuksista, tärytyksen voimakkuudesta, pyöräpaineesta yms. kaluston kapasiteettiin ja tehokkuuteen vaikuttavista tekijöistä. Usein tällaiset ohjeet voivat olla vain suuntaa antavia, kun niitä sovelletaan jyräystyön valvontaan. Mutta niiden ilmoittaminen suunnitelman yhteydessä on kuitenkin välttämätöntä, sillä samalla kun ne vaikuttavat kustannuksiin, osoittavat ne valvojalle periaatteet, jolla kalustoa tulisi käyttää.

### 1.3.3 Muut työmenetelmäohjeet

Jyräyksen ohella kastelu tarvitsee usein lähempiä ohjeita suoritustavasta. Suunnitelmaa tehtäessä ei ole tiedossa tarvitaanko kastelua ja miten paljon. Sen vuoksi voidaan antaa ohjeita vain esim. seuraavista seikoista: vedenottoaikoista, kastelun suorittamisajankohdasta,



vesimäärän laskemisesta tms. Koska kastelulla on ratkaiseva merkitys tiivistämisen kustannuksissa, olisi pyrittävä määrittelemään ne olosuhteet, joissa kastelamiseen ryhdytään toisin sanoen kuinka paljon alle optimin vesipitoisuuden on laskettava ennen kastelun aloittamista. Vastaavasti kuin kastelusta voidaan antaa muistakin työtapakysymyksistä työkohtaisia ohjeita.

#### 1.3.4 Työn ajoitus, työkohteet ja työjärjestys

Tiivistämistyö ajoitetaan koko hankkeen aikataulun asettamiin kehyksiin valitsemalla kapasiteetiltaan sopiva kalusto työn suorittamista varten. Milloin kehys on väljä, on tiivistämistyönaikataulu laadittava myös sikäli realistiseksi, ettei tiivistämistä tarpeettomasti jatketa kauempaa kuin on välttämätöntä riittävän tiiviyn ja kantavuuden saavuttamiseksi. Työmaa jaetaan tarkoituksenmukaisiin osiin, joissa jyräyskertymäärät ovat yhtenäiset tai työn valvonta helposti järjestettävissä ja näille työkohteille osoitetaan suoritusjärjestys, joka samalla on ohjeena kaluston käytöstä.

#### 1.3.5 Kustannukset

Laaditun suunnitelman pohjalta on laskettavissa tiivistämiskustannukset sekä työkohteittain että koko työmaata koskevinä. Joskaan tiivistämisen osuus rakenteen kustannuksissa ei aina ole ratkaiseva, on se kuitenkin siinä määrin vaihteleva, että kustannussuunnittelun kannaltakin tiivistämistyön yksityiskohtainen suunnittelemine on mielekästä.

#### 1.4 SUUNNITELMAN ESITYSTAPA

Tiivistämistyön suunnittelu on osa työmaan työnsuunnittelua ja niinpä edellä luonnehdittu suunnitelma sisältöineen on sitä perusmateriaalia, jota tarvitaan työsuunnitelman laatimiseksi. Tämän vuoksi ei tiivistämistyön suunnittelun tuloksia esitetä omana erillisenä asiakirjana, vaan ne sisällytetään työnsuunnittelun asiakirjoihin. Tiivistäminen on käsitelty tähän tapaan myös voimassaolevissa työnsuunnitteluohjeissa (TVH 2.886 ja TVH 2.887). Mutta tiivistämisen asemaa työnsuunnittelun osana on syytä korostaa entistä enemmän ja tässä mielessä esitetään kuvassa 1 esimerkki tiivistämistoimenpiteiden merkitsemisestä tie-aikakaavioon. Sellaiset tiivistämistyön suunnitteluun liittyvät seikat, jotka eivät kyllin selvästi käy ilmi varsinaisesta työsuunnitelmasta, on syytä sisällyttää työkohtaiseen työselitykseen.

### 2. TIIVISTÄMISTYÖN VALVONTA

#### 2.1 VALVONNAN KÄSITE

Tiivistämisen valvonnalla ymmärretään usein vain laaduntarkkailua tiiviys- ja kantavuusmittauksineen. Edelläolevan nojalla voidaan valvontaan lisätä ainakin tiivistämissuunnitelman toteutumisen seuraaminen, mukaan lukien kaluston käytön työnjohdollinen valvonta. Edelleen on hyvältä valvonnalta edellytettävä jatkuvaa suunnitelman tarkistamista olosuhteissa tapahtuneiden muutosten ja laaduntarkkailutulosten pohjalta. Tiivistämistyön valvonta on siten monipuolinen ja hyvää asiantuntemusta vaativa tehtävä.

1:10000/1:500

15

16

17

TSV

Tv  
Lj

TELA

HtMr

HUOM. Merkintä JK 20/12 tarkoittaa:  
Jyrätään 12 kertaa jyrällä JK 20

F/100

N

E/80

N

A/24

1610 eristyskerros 800 m<sup>3</sup>rtr (tiivistys ja muotottu)  
0,5 TH + 2 KA + JK 20/4 + 1 SM  
(jyrätty talvella JK 20/10)

Tiiviiden toteaminen ja korj. (eristys)

1410 kallion leikk. (muotoilu ja tiivist. soralla 1000 m<sup>3</sup>itt)  
PT 05 + 0,5 TH + 4 KA + JT 05/3 + 2 SM

1620 jakava kerros 2500 m<sup>3</sup>rtr  
(ajo ja tiivistys)

PT 05 + 0,5 TH + 6 KA + JT 05/6 + 2 SM  
(kastelu 2 KA)

1620 jakava kerros 3500 m<sup>3</sup>rtr  
(ajo ja tiivistys)

PT 05 + 0,5 TH + 6 KA + JK 20/12 + 2 SM  
(kastelu 2 KA)

Kantavuusmitt. (jakava)

1630 kantava kerros 3700 m<sup>3</sup>rtr (ajo ja tiivistys)  
TH 10 + 6 KA + JT 05/3 + 2 SM  
(+ kastelu 2 KA)

Kantavuusmitt. (kantava)

HEINÄ

ELO

KUVA 1. ESIMERKKI TIIVISTÄMISTOIMENPITEIDEN  
ESITÄMISESTÄ TIE - AIKAKAIVIOSSA

VII



## 2.2 VALVOMISEN SUORITUSTAPA

### 2.2.1 Suunnitelman tarkistaminen

Jo ennen työn alkua on tarkistettava vastaavatko todelliset olosuhteet suunnitelmassa oletettuja ja, jos muutoksia on tapahtunut, on tehtävä johtopäätökset etenkin kaluston valinnan suhteen.

### 2.2.2 Kaluston oikean käytön valvonta

Työn alussa on syytä suorittaa ainakin suurehkoilla työmailla tiivistämiskaluston "sisäänajo", jolloin tehostetulla valvonnalla ensimmäisten työpäivien aikana selvitetään onko valittu tiivistämiskalusto edullinen ja jos tyydyttäviin tuloksiin ei päästä, tehdään suunnitelmaan tarvittavat korjaukset ja tarvittaessa vaihdetaan kalustoa.

Myöhemmin työn kuluessa seurataan jyräyskertamääriä, mitataan jyrien nopeuksia, valvotaan tärytehoa ja kaikin puolin pyritään toteamaan, että tiivistämiskalustoa käytetään tehokkaasti ja tarkoitettulla tavalla. Jyräyskertamäärien, jyräyspeiton ja jyräysnopeuden mittaaminen suoritetaan helpoimmin välillisesti siten, että jyrälle annetaan määrätty osuus tiestä jyrättäväksi ja verratetaan jyrän tähän työhön käyttämää aikaa siihen aikaan, joka saadaan laskennollisesti. Jyräyskaluston oikean käytön valvominen on ilmeisesti varsin puutteellista tienrakenustyömailla, mikä johtuu, ei vain ohjeitten ja asiantuntemuksen puutteesta, vaan myös tiivistämistyön aliarvostuksesta.

### 2.2.3 A i k a t a u l u n   j a   k u s t a n n u s - t e n   s e u r a a m i n e n

Etenkin milloin alkuperäistä tiivistämissuunnitelmaa joudutaan muuttamaan, on syytä seurata muutoksen vaikutusta työn etenemisnopeuteen sekä kustannuksiin. Poikkeuksellisen korkea kustannus on usein merkki väärästä tiivistämismenetelmästä.

### 2.2.4 L a a d u n t a r k k a i l u

Laaduntarkkailu antaa valvojalle pääosan niistä tiedoista, joita hän tarvitsee ja joihin hän voi nojautua päätöksiä tehdessään. Yleisimmin mitattavat suureet ovat tiivistettävän materiaalin rakeisuus ja vesipitoisuus sekä kerroksen tiiviys ja kantavuus. Laaduntarkkailun suoritustavan lähempi tarkastelu ohitetaan tässä ja käsitellään erikseen. Sensijaan seuraavassa tutkitaan niitä toimenpiteitä, mihin huonot laaduntarkkailutulokset antavat aihetta.

## 2.3      T O I M E N P I T E E T   H U O N O J E N   L A A D U N T A R K K A I L U T U L O S T E N J O H D O S T A

Hyvä valvonta edellyttää, että laaduntarkkailun tulokset viipymättä sovelletaan työhön. Jos tulokset osoittavat, että riittävä tiiviys ja kantavuus on saavutettu, on epäilemättä tiivistäminen lopetettava, mutta epätyydyttävät tulokset antavat enemmän aihetta miettimiseen.

### 2.3.1 V e s i p i t o i s u u s   a l l e   o p t i m i - a r v o n

Tiivistämistyön aikaisina väliaikatietoina laaduntarkkailu

antaa ensinnäkin tietoja tiivistettävän materiaalin vesipitoisuudesta. Verrattaessa tulosta ennalta tutkittuun optimiarvoon on muistettava, että vesipitoisuus saakin vaihdella tietyllä alueella alle ja yli optimiarvon, sillä optimiarvo vastaa 100 % tiiviysastetta ja näin hyvään tiiviyteen ei yleensä pyritä. Jos vesipitoisuus kuitenkin ylittää huomattavasti optimiarvon ei tiivistäminen ole enää mahdollista tai se ei ainakaan kannata; riittävää tiiviyttä ei voida tiivistämällä saada aikaan. Tällöin on parasta keskeyttää työ ja odotella kuivumista tai käyttää jotain kuivempaa materiaalia, jos se on mahdollista. Jos vesipitoisuus alittaa edellämainitun alimman sallitun arvon ei voida välttyä lisäjyräykseltä. Jos alitus on vähäinen, on syytä varautua jyräystyön lisäämiseen niin, että vaadittu tiiviys kaikesta huolimatta saavutettaisiin. Jos alitus on huomattava, on suoritettava kastelua, mutta lisättävä jyräystyötä samanaikaisesti. Pelkkä veden lisäys ei käytännössä tuota toivottua tulosta eikä ole taloudellisesti kannattavaa.

### 2.3.2 T i i v i y s h u o n o

Mikäli kentällä suoritetuissa mittauksissa tiivistettävän kerroksen tilavuuspaino todetaan niin alhaiseksi, että tiiviysaste ei täytä asetettua vaatimusta, on tiivistämistä jatkettava joko kastelemalla tai ilman riippuen materiaalin vesipitoisuudesta. Tämä pätee kuitenkin vain pääsääntöisesti. Jos esim. jakavaa kerrosta jyrättäessä pyritään syvyysvaikutusta lisäämään käyttämällä suurta jyräyskertamäärää, saattaa ns. optimijyräyskertamäärä ylittyä ja kerroksen pintaosa alkaa värähdellä jyrän tahdissa menettäen uudelleen tiiviytensä. Näin täryjyräyksessä voi heikko tiiviys olla merkinä yhtähyvin yli- kuin alijyräyksestä. Mikäli ylijiyräytymisen mahdollisuus



on olemassa, voidaan asiaa auttaa vähentämällä jyrän tärytehoa lisäräjäytysten ajaksi käyttämällä lisäjyryksessä kumipyöräjyryä tai purkamalla löyhtynyt kerros ja tiivistämällä uudelleen.

### 2.3.3 K a n t a v u u s h e i k k o

Jos sekä kantavuus- että tiiviysarvot ovat heikkoja, on ensi sijassa käytettävä edellä esitettyjä menettelytapoja tiiviyn parantamiseksi. Mutta jos kantavuus on huono hyvästä tiiviyydestä huolimatta on etsittävä muita keinoja. Heikko kantavuus saattaa ilmaista pohjamaan heikkoa kantavuutta ja päällysrakenteen väärää mitoitus- ta. Tällöin on joko tyydyttävä heikkoihin tuloksiin tai sovittava päällysrakennepaksuuden lisäämisestä. Heikko kantavuus voi olla myös merkki huonosta materiaalista tutkittavassa kerroksessa. Jos materiaali vain vaivoin täyttää rakeisuusvaatimuksen, on todennäköistä, että kantavuusarvot jäävät heikoiksi. Edelleen huono kantavuus voi olla merkkinä meillä hyvin yleisestä virheestä, että kantavuusmittaukset on tehty heti kastelun ja tiivistämisen jälkeen, jolloin korkea vesipitoisuus alentaa kantavuusarvoa. Suurin tiiviys saavutetaan optimikosteudessa ja sen vuoksi tiivistettäessä pyritään tähän kosteustilaan. Mutta suurin kantavuus saavutetaan materiaalin ollessa kuivaa ja kantavuus alenee voimakkaasti vesipitoisuuden lisääntyessä. Kun tätä riippuvuussuhdetta ei kuitenkaan tunneta, on käytännön työssä varattava viimeisen kastelukerran tai sateen jälkeen riittävästi aikaa (2-4 päivää) kosteuden tasaantumiseksi ennenkuin kantavuusmittauksia suoritetaan. Oikea kantavuuskokeiden suoritus- hetki olisi silloin, kun materiaalin kosteus vastaa sen luonnollista vesipitoisuutta tiepenkereessä. Kun tämä virhe on eliminoitu ja edelleen tiiviys on hyvä, mutta kantavuus huono, ovat syyt syvemmällä kuin riittämättö-

mässä jyräyksessä. Jyräyksen jatkaminen onkin arveluttava keino kantavuuden lisäämiseksi tässä tilanteessa. Eräissä tapauksissa kerroksen avaaminen esim. tiehöylänterällä, kastelu ja uudelleen jyrääminen saattaa parantaa kantavuutta, koska toimenpide poistaa lajittuneisuuden, joka on saattanut syntyä jyräyksen yhteydessä voimakkaasta kastelusta tai hiekkaisesta materiaalista johtuen. Useimmiten kuitenkin kantavuutta voidaan parantaa vain lisäämällä päälle tulevien kerrosten paksuutta tai käyttämällä niissä tavallista parempia materiaaleja, joiden ansiosta tien lopullinen kantavuus saadaan riittäväksi.

### 3. LOPPUYHTEENVETO

Tiivistämiseen liittyy edelleen monia epäselviä kysymyksiä. Kenttätöyssä aiheuttaa muuttuvien tekijöitten suuri lukumäärä sen, että periaatteessa hyvinkin selvät asiat ovat vaikeasti hallittavissa ja näin on käynyt myös tiivistämisen teoriaa sovellettaessa käytäntöön. Teoreettinen tarkastelu tarvitsee tuekseen tietoja ja kokemuksia kenttätöön kulusta. Ja tämä tietojen hankinta saattaa monesti vaikuttaa hankalalta yrittämisen ja erehtymisen polulta. Mutta sekin polku on käytävä loppuun asti, jotta luonnon materiaaleista opittaisiin saamaan irti kaikki mahdollinen tien kantavuuden parantamiseksi.

Tiivistämiseen kohdistetaan kuitenkin usein vääriä odotuksia. Tiivistäminen ei onnistu missä olosuhteissa tahansa, eikä huonosta materiaalista tehdä jyräämällä kelvollista. Välilliset toimenpiteet ovat yhtä tärkeitä kuin itse jyrääminen; valitsemalla kunnollisia materiaaleja, rakentamalla ohuita kerroksia ja ajoittamalla työ niin, että tiivistämiselle on luontaiset edellytykset voitaisiin välttää se, että tiivistämisestä muodostuu ylivimaisen vai-

kea tehtävä. Tämä edellyttää kuitenkin, että opimme nykyistä selvemmin tunnustamaan tiiviyden tiepenkereen oleellisimmaksi mittapuuksi aina pohjasta pintaan asti.

13.4.71 JR.



Dipl.ins. S. Lohijoki

Rkm I. Viherlehto

VII TIIIVISTÄMISTYÖN LAADUN  
TARKKAILU

## VII TIIIVISTÄMISTYÖN LAADUN TARKKAILU

### YLEISTÄ

Tvh/Maanjärjestystoimikunnan ehdotuksessa tienrakennustöiden laadunvalvontaohjeiksi (tammikuu 1970) määritellään laadunvalvonnan tehtävä seuraavasti: "Laadunvalvonnan tehtävänä on suorittaa työmaalla sellaisia tarkkailutoimenpiteitä, joiden avulla rakennuttaja saa varmuuden siitä, että tuote täyttää sille suunnitelmissa, työselityksissä ja muissa suunnitelma-asiakirjoissa asetetut laatuvaatimukset. Laadunvalvonta koskee vain rakenteiden teknillistä laatua. Milloin tämän toteamiseksi ei ole mahdollista käyttää fyysisiä kokeita tai laatua ei ole mahdollista todeta rakennetta tarkastelemalla, on työmenetelmiä seuraamalla varmistauduttava siitä, että rakenne täyttää sille asetetut vaatimukset."

Määritelmässä puhutaan rakennuttajasta, mutta voitaneen pitää itsestään selvänä, että myös rakentaja eli rakentava taso tarvitsee samat tiedot. Rakenteen laatu pyritään selvittämään kokeellisesti ja määräyksiä työmenetelmien suhteen tulisi antaa vain poikkeustapauksessa. Näin menetellen annetaan rakentajalle mahdollisuudet kehittää uusia ja parempia työmenetelmiä.

Tiivistämistyön laaduntarkkailussa voidaan yleensä turvautua kokeisiin: voidaan määritellä joko tiiviysaste tilavuuspainomääritysten perusteella tai kantavuusarvo ja tiiviyttä kuvaava suhde  $E_2/E_1$ . Vain erittäin kivisessä tai lohkareisessa pöngertäytytteessä ei voida tehdä

Proctor-määrittelyksiä eikä eräiden maalajien heikon kantavuuden vuoksi voida myöskään aina määrittellä E-arvoja. Tällöin joudutaan turvautumaan työselityksissä ja standardeissa esitettyihin ohjejyräyskertamääriin.

Seuraavassa pyritään selvittämään alusrakenteen ja päällysrakenteen sitomattomien kerrosten tiivistämistyön laadunvalvonnassa huomioonotettavia seikkoja sekä esittämään tärkeimmät tiivistämistyön laadunvalvonnassa kysymyksen tulevat kokeet ja mittaukset. Ehdotukset ja mielipiteet ovat kirjoittajien omia, eivätkä ne missään suhteessa edusta tvh:n virallista kantaa. Kirjoituksen tarkoituksena onkin lähinnä keskustelun herättäminen.

## 1. TIIVISTÄMISTYÖN LAADUNVALVONNAN SUUNNITTELU

Mikäli työmaalla tehdään laadunvalvontasuunnitelma, sisältää se myös suunnitelman tiivistämistyön laadun tarkkailuksi. Toistaiseksi laadunvalvontasuunnitelma on koko maassa verrattain uusi käsite. Kokemukset sen käytöstä ovat erittäin vähäiset ja suunnitelma tekee yleensä vasta tulooan eri piireihin. Sen enempää laadunvalvonnan kokonaissuunnittelulle kuin tiivistämistyön laaduntarkkailun suunnittelullekaan ei ole tvh:n toimesta annettu ohjeita, joten käytäntö on kirjavaa. Koska piirien toimesta on tällaista suunnittelua lähdetty vapaaehtoisesti harrastamaan, on sille olemassa ilmeistä tarvetta. Tosin kaikkalainen suunnittelu on tällä hetkellä erittäin korkeassa kurssissa, voitaisiinpa ehkä puhua "suunnittelusta puhumisen hysteriasta". Kuitenkin kieltämättä laadunvalvonnan suunnittelulla on saavutettavissa eräitä huomionarvoisia tuloksia, joihin kannattaa pyrkiä.



## 1.1 SUUNNITTELUN LÄHTÖKOHTA JA TAVOITTEET

Tavoitteena, mihin laaduntarkkailun suunnittelulla pyritään, on luonnollisesta korkeampi laatutaso, laaduntarkkailutulosten edustavuuden ja luotettavuuden lisääminen sekä kustannusten pienentäminen. Suunnittelulla pyritään etukäteen arvioimaan erilaisten mittaus- ja tutkimusmenetelmien käyttötarvetta, erilaisten mittaus-ten lukumäärää, tutkimushenkilökunnan tarvetta sekä ohjelmoimaan piirin tutkimus- ja laboratoriovälineistön käyttöä. Hyvin lyhyellä tähtäyksellä ei esim. henkilöstön tai kaluston käyttöä kannata eikä voikaan suunnitella. Ilmeisesti sopivana suunnittelujaksona laadunvalvonnassa voidaan pitää yhtä vuotta, jolloin laaduntarkkailusuunnitelma tulisi laadittavaksi TAS:n tarkistuksen yhteydessä syksyllä. Vuotta pitemmällä tähtäimellä kannattanee hahmotella korkeintaan henkilötarvetta ja suurehkoja kalustohankintoja. TAS:n tarkistuksen yhteydessä laaditut suunnitelmat on luonnollisesti tarkistettava rakennuskausittain ts. TLTS:n laatimisen yhteydessä.

Tvh:n laadunvalvontaohjeissa alusrakenteelle ja päällysrakenteen sitomattomille kerroksille on esitetty vaatimukset tiiviysasteille ja kantavuusarvoille sekä annettu ohjeet mittaustiheyksistä. Ilmeisesti nämä antavat riittävän perustan suunnitelman laatimiselle. Kuvassa 1 on esitetty Turun piirissä käyttöön otettava lomake alusrakenteen ja päällysrakenteen sitomattomien kerrosten laadunvalvontasuunnitelmaksi. Sen tarkoituksena on auttaa niin työmaa- kuin toiminnanhaaratasoakin laaduntarkkailun valvonnassa ja laboratoriohenkilökunnan suunnittelussa sekä antaa tietoja maatutkimuselimelle laboratorio- yms. tutkimusvälineistön käytön ja hankinnan suunnittelemiseksi.

A. LAADUNVALVONTASUUNNITELMA (TAS:n tarkistus)  
ALUSRAKENNE JA PÄÄLLYSRAKENTEEN SITOMATON OSA

Vuosi 197                      Työmaan n:o.....

Tieosa ja plv. ....

Laboratoriotutkimukset tehdään: omassa kenttälaboratoriossa (    )  
..... työmaan kenttälaboratoriossa (    )  
..... Turun/Porin laboratoriossa (    )

Laboratoriohenkilökuntaa ..... kpl

Laadunvalvontamestari .....

	I rak.kausi	II rak.kausi	III rak.kausi	Yhteensä
1. Alusrakenteen rakei-..... suus tutkimuksia (kpl)	.....	.....	.....	.....
1.1 Tiiveystutkimuksia .....	.....	.....	.....	.....
1.2 Alusrakenne valmistuu(plv.) ...	.....	.....	.....	.....
2. Suodatinkerros (m <sup>3</sup> rtr).....	.....	.....	.....	.....
2.1 Rakeisuustutkimuksia(kpl).....	.....	.....	.....	.....
2.2 Tiiveystutkimuksia(kpl).....	.....	.....	.....	.....
2.3 Suodatinkerros valmist.(plv)..	.....	.....	.....	.....
3. Eristyskerros (m <sup>3</sup> rtr).....	.....	.....	.....	.....
3.1 Rakeisuustutkimuksia(kpl).....	.....	.....	.....	.....
3.2 Tiiveystutkimuksia (kpl).....	.....	.....	.....	.....
3.3 Eristyskerros valmist.(plv)...	.....	.....	.....	.....
4. Jakava kerros (m <sup>3</sup> rtr).....	.....	.....	.....	.....
4.1 Rakeisuustutkimuksia (kpl)....	.....	.....	.....	.....
4.2 Tiiveystutkimuksia (kpl).....	.....	.....	.....	.....
4.3 Kantavuustutkimuksia(kpl).....	.....	.....	.....	.....
4.4 Kantavuustutkimusten suoritusajankohta (pvm.).....	.....	.....	.....	.....
4.5 Jakava kerros valmist.(plv.)..	.....	.....	.....	.....
5. Kantava kerros (m <sup>3</sup> rtr).....	.....	.....	.....	.....
5.1 Rakeisuustutkimuksia (kpl)....	.....	.....	.....	.....
5.2 Tiiveystutkimuksia(kpl).....	.....	.....	.....	.....
5.3 Kantavuustutkimuksia(kpl).....	.....	.....	.....	.....
5.4 Kantavuustutkimusten suoritusajankohta(pvm).....	.....	.....	.....	.....
5.5 Kantava kerros valmist.(plv)..	.....	.....	.....	.....
Huomautuksia:.....				
.....				
..... ssa .....kuun .....p:nä 197				

Työpäällikkö \_\_\_\_\_

Työmaanpäällikkö \_\_\_\_\_

15.1.71

Kuva 1. Alus- ja päällysrakenteen laadunvalvonta-  
suunnitelma

## 1.2 MITTAUS- JA TUTKIMUSMENETELMIEN SUUNNITTELU

Mittaus- ja tutkimusmenetelmät ovat tällä hetkellä verrattain vakiintuneet, vai pitäisikö sanoa taantuneet, ja ne toistuvat likimain samanlaisina kaikissa töissä. Aina ei kuitenkaan voida menetellä täysin rutiininomaisesti tvh:n laadunvalvontaohjeiden mukaan, joten myös mittaus- ja tutkimusmenetelmät on syytä suunnitella etukäteen.

### 1.2.1 Rakeisuustutkimukset

Tiivistettävästä kerrosmateriaalista on aina tehtävä rakeisuustutkimuksia. Laadunvalvontaohjeet edellyttävät, että työn aikana otetaan vähintään yksi näyte jokaista alkavaa 1000 k-m<sup>3</sup>:n aineserää kohti, mutta näytetiheydeksi suositellaan tehokkaan laadunvalvonnan kannalta yksi näyte/500 k-m<sup>3</sup>. (k-m<sup>3</sup> on vanha merkintä. Ilmeisesti sen sijasta voitaisiin käyttää laatua m<sup>3</sup> rtd). Alusrakenteen rakeisuutta sen sijaan tutkitaan vain materiaalin kantavuusluokan selvittämiseksi, joten tutkimuksia ei tehdä mitenkään systemaattisesti määrävälein.

### 1.2.2 Tiiviys- ja kantavuusmittaukset

#### 1.2.2.1 Alusrakenne

Tvh:n laadunvalvontaohjeiden mukaan pengertäytteen tiiviys on määritettävä kerran jokaista alkavaa 1000 k-m<sup>3</sup>:n (m<sup>3</sup> rtd) pengertäyte-erää kohti. Ohjeissa ilmeisesti



edellytetään, että materiaalista tutkitaan maksimikuivatilavuuspaino ja optimikosteus ja että tiivistämistä varten materiaali saatetaan lähelle optimikosteutta. Nykyisin pengertäytteenä käytetään yleensä routivia maalajeja, jotka ovat joskus hyvinkin vaikeasti käsiteltävissä. Materiaalista voidaan luonnollisesti tutkia Proctor-menetelmällä optimikosteus ja maksimikuivatilavuuspaino, mutta tuskin mikään työmaa rupeaa lisäämään vettä herkästi velliintyvään materiaaliin, jos sen vesipitoisuus on alle optimikosteuden. Siksi alusrakenteen tiiviyn tutkimisessa voitaisiin käyttää seuraavaa menettelyä: Penkereeseen tiivistetystä materiaalista otetaan näyte, josta tehdään Proctor-koe ja määritetään tilavuuspaino siinä kosteudessa, mikä materiaalilla on penkereessä. Sitten määritetään volymetriä käyttäen penkereeseen tiivistetyn materiaalin tilavuuspaino edelleen tässä samassa kosteudessa. Näin saadun tilavuuspainon suhdetta aikaisemmin määritettyyn Proctor-tilavuuteen pidetään tiiviysasteena.

Jos tämän "märkätiiviysasteen" vaatimuksena pidetään normaaleja tiiviysasteen vaatimuksia 87 % ja 92 % huononnetaan laatutasoa vaaditusta jonkun verran. Käytännössä kuitenkin tuskin tapahtuu laatutason huononemista. Päinvastoin koska nyt jää pois hidas materiaalin kuivattaminen voidaan työn kuluessa käyttää hyväksi verrattain nopeasti tehtäviä tiiviystutkimuksia. Saatavien kokemusten perusteella voidaan myöhemmin harkita "märkätiiviysastevaatimuksen" nostamista esim. 90 % ja 95 %:iin.

Tvh:n uusissa alusrakenteen ja päällysrakenteen sitomattoman osan laadunvalvontaohjeissa on esitetty liitteenä "Maalajien maksimikuivatilavuuspaino raekokosuhteen funktiona". Käyttämällä tästä saatavia tilavuuspainoarvoja voidaan luopua Proctor-kokeen suorittami-

sesta. Laadunvalvontaohjeissa ei ole ilmoitettu, milloin liitteestä saatavia tilavuuspainoarvoja voidaan käyttää, mutta ilmeisesti nimenomaan routivan alusrakenteen yhteydessä niiden käyttö on perusteltua.

Routivat penkereet suunnitellaan tutkittaviksi em. "märkätiiviysastemäärittäyksiä" tai em. liitteestä saatavia tilavuuspainoarvoja käyttäen. Tiiviysmäärittäyksiä tehdään kustakin kerralla tiivistettävästä kerroksesta päällysrakenneluokissa 1...4 100 metrin välein kullakin ajokaistalla sekä 200 metrin välein pientareilla. Koekielten lukumäärää lisätään tai vähennetään työn edistytessä riippuen materiaalin homogeenisuudesta ja koetuloksista.

#### 1.2.2.2 Suodatin ja eristyskerros

Yleensä nykyisin suodatin- ja eristyskerrokset tehdään pääasiassa syksy- ja talvityönä. On kyseenalaista, kannattaako niitten tiiviyyttä suunnitella tällöin tutkittavaksi. Eristyskerros löytyy joka tapauksessa sulamisen myötä - minkä verran, siitä ollaan eri mieltä. Eristyskerroksen tiiviys kannattanee suunnitella tutkittavaksi sulana aikana pistokoeluoentoisesti jakavan kerroksen tiivistämisen jälkeen sen läpi. Jos tällöin kerroksessa havaitaan vaaditun tiiviysasteen alituksia, voidaan tutkimuspisteiden lukumäärää lisätä. Jos suodatin- tai eristyskerros poikkeustapauksessa rakennetaan keväällä tai kesällä, tutkitaan kerroksen tiiviysaste normaalisti laadunvalvontaohjeiden mukaan. Laadunvalvontaohjeet edellyttävät, että tiiviys määrätään vähintään kerran jokaisesta alkavaa  $1000 \text{ k-m}^3$ :n ( $\text{m}^3 \text{ rtd}$ ) aineserää kohti. Selvyyden vuoksi mittaukset olisi kuitenkin mieluummin tehtävä kuten Maanjäristystoimikunta suosittelee päällysrakenteissa 1...4 100 m:n välein kullakin ajokaistalta ja 200 m:n välein pientareilta.



#### 1.2.2.3 Jakava ja kantava kerros

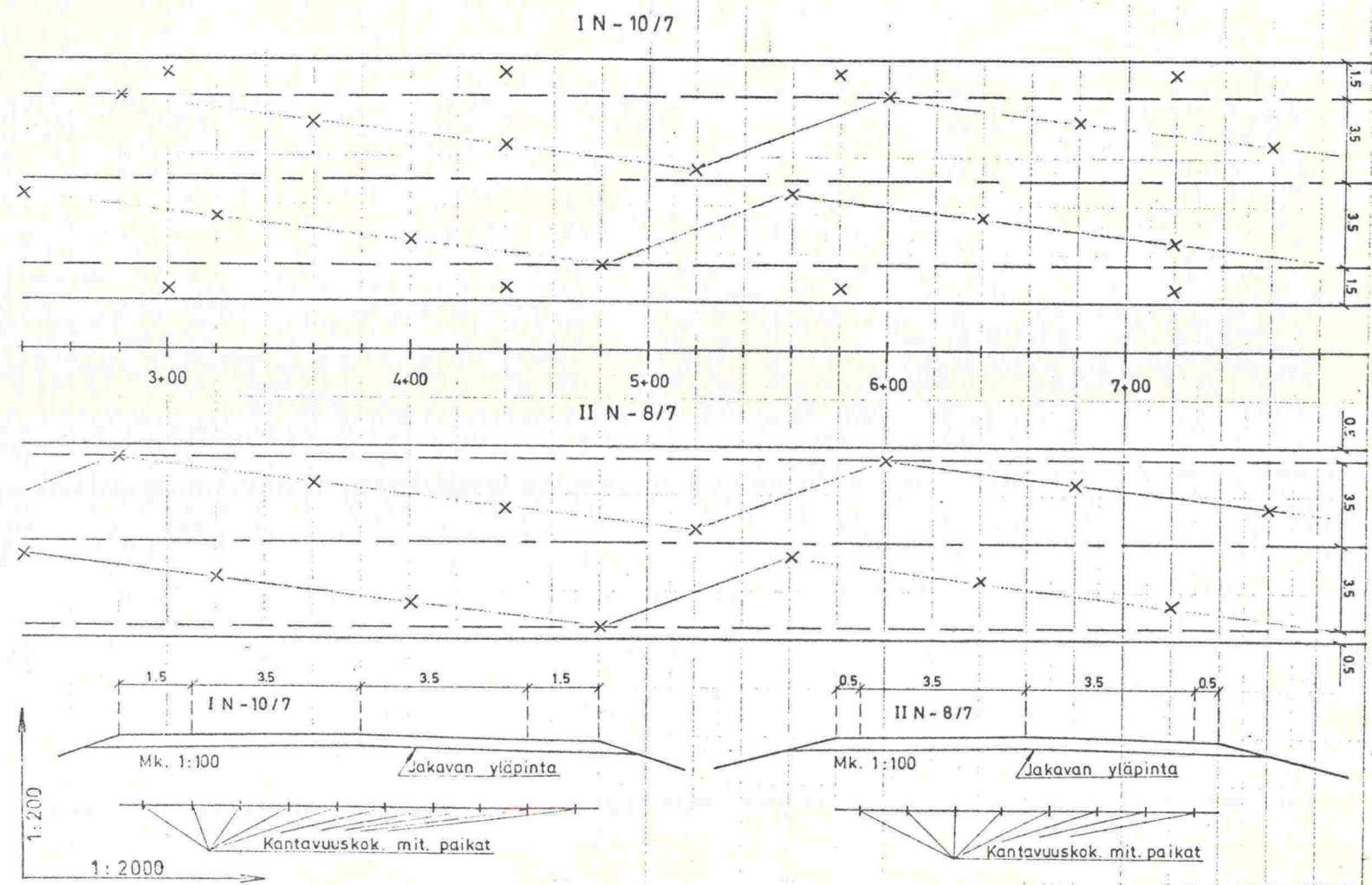
Nykyisin jakavan ja kantavan kerroksen tekeminen murskastusta materiaalista on yhä enemmän yleistynyt. Proctor-koe tällaisesta samoin kuin muustakaan karkeasta materiaalista ei yleensä anna täysin luotettavaa kuvaa, vaikka käytettäisiinkin ohjeissa annettuja kivisyyskorjauksia. Tvh/Maanjärjestystoimikunnan ehdotuksessa tienrakentamistöiden laadunvalvontaohjeiksi esitetään, että "Kantavuuden määrittämistä tiivysasteen sijasta olisi pyrittävä mahdollisuuksien mukaan suosimaan, koska se yleensä nopeampana ja helpommin suoritettavana antaa paremmat mahdollisuudet työn häiriöttömälle toteuttamiselle." Tämä esitys tulee toivottavasti virallisesti hyväksytyyn laadunvalvontaohjeeseenkin. Em. ehdotuksessa on myös seuraava suositus: "Jos tiiviyn määrittäminen ei voi suoriteta tai sen käytöstä halutaan luopua, tulee kantavuuskokeiden määrää lisätä siten, että se on vähintään 2/3 vaadittavien tiiviys- ja kantavuuskokeiden yhteenlasketusta määrästä." Tällöin kantavuusmittauksia tulisi suorittavaksi kuvan 2 osoittamalla tavalla.

#### 1.2.2.4 Stabiloitava alusrakenne tai päällysrakennekerros

Stabilointityössä tiivistyksen laaduntarkkailu ei sanottavasti poikkea päällysrakennekerrosten laadunvalvonnasta. Lähinnä sementtistabiloinnissa sementin verrattain nopea sitoutuminen tuo laaduntarkkailuun oman erikoispiirteensä: laaduntarkkailu on ehdottomasti tehtävä samanaikaisesti tiivistämistyön kanssa. Varsinkaan sementtistabiloinnissa ei työn kuluessa voida kuivatilavuuspainon määrittämiseksi kuivattaa näytteitä, mikäli laaduntarkkailutuloksien perusteella aiotaan valvoa työtä. Vesipitoisuutta seurataan esim. karbidometrin avulla, koska tiivistämistyö pyritään tekemään materiaalin ollessa optimikosteudessa. Tuntien kosteusprosentti voidaan märkätilavuuspaino muuntaa kuivatilavuuspainoksi ja täten määrittää laadunvalvontaohjeiden mukainen tiiviysaste.



Kuva 2. Kaavio kantavuuskokeiden mittauspaikkojen valinnasta



Kaavio kantavuuskokeiden mittauspaikoista rakenteilla olevilla teillä silloin kun ko. kerroksesta ei tehdä tiiveystutkimuksia (päällysrakenteet 1...4)

### 1.3 MITTAUSVÄLINEISTÖN KÄYTÖN SUUNNITTELU

Tiivistämistyön laadunvalvonnassa tarvittavat Proctor-välineet sekä volymetrit kuuluvat periaatteessa jokaisen työmaan kalustoon tai ne ovat korkeintaan muutaman työmaan yhteisiä. Levykuormitusvälineistön käyttö sen sijaan joudutaan ohjelmoimaan useammalle työmaalle. Kuten edellä on todettu, se tehdään työmaiden laadunvalvontasuunnitelmista saatavien tietojen perusteella. Ohjelmaa laadittaessa on syytä kiinnittää huomiota levykuormitusvälineistön liikkuvuuteen. Ohjelma on pyrittävä saamaan sellaiseksi, että kesken jonkun tieosan kantavuusmittausten tekoa levykuormituslaitteet voidaan siirtää toiselle työmaalle koejyräysten ajaksi. Nimenomaan tiivistämistyön alkuvaiheessa kannattaa tehdä runsaasti kantavuusmittauksia oikean jyräyskertamäärän selvittämiseksi. Vasta silloin, kun tiivistämistyön laaduntarkkailussa käytettyjen tutkimus- ja mittausvälineitten avulla on pystytty teettämään työ optimijyräyskertamäärällä, voidaan puhua niitten onnistuneesta käytöstä.

### 1.4 HENKILÖSTÖN SUUNNITTELU

Tiivistämistyön laadunvalvonnan kannalta joudutaan suunnittelemaan lähinnä laboratoriohenkilöstö. Kuten aikaisemmin on todettu, se voidaan tehdä laadunvalvontasuunnitelmasta saatavien tietojen perusteella. Tällöin voidaan todeta myös tuleva laboratoriohenkilöstön koulutustarve.

### 1.5 SUUNNITELMAN LAATIJAT

Mikäli, kuten esim. Turun piirissä on asianlaita, työmaille on nimetty laadunvalvontamestari, toimivat nämä tiivistämisen laadunvalvontasuunnitelman laatijoina. Ellei laadunvalvontamestaria ole, laatii suunnitelman se rakennusmestari, jonka vastuulla tiivistämistyön laaduntarkkailu tulee olemaan. Luonnollisesti työmaapäällikkö vastaa myös laadunvalvontasuunnitelmasta ja näin ollen allekirjoittaa sen.

## 2. TUTKIMUKSET JA MITTAUKSET

Tutkimusten ja mittausten tarkoituksena on antaa tietoa tiivistämistyön suunnittelemiseksi, valvomiseksi sekä lopullisen laatutason toteamiseksi. Ne antavat toisin sanoen työn johdolle sen tiedon, mikä on välttämätön työn teknisesti ja taloudellisesti oikein suorittamiseksi. Seuraavassa käydään lähinnä luettelomaisesti läpi tärkeimmät tiivistämistyön laaduntarkkailussa käytetyt tutkimukset ja mittaukset. Ne on tarkemmin selostettu tvh:n julkaisussa n:o 2.660 "Maarakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeita".

### 2.1 LABORATORIOTUTKIMUKSET

#### 2.1.1 R a k e i s u u s t u t k i m u k s e t

Materiaalin tiivistettävyyteen vaikuttavat ratkaisevasti rakeisuus ja erityisesti raekokosuhte, jotka selvitetään rakeisuustutkimuksilla. Rakeisuus tutkitaan joko kuiva- tai pesuseulontaa käyttäen. Mikäli seulonnan jälkeen näyte sisältää yli 10 % 0,074 mm:n seulan läpäisevää ainesta, joudutaan materiaalista lisäksi tekemään areometrikoe.

#### 2.1.2 V e s i p i t o i s u u s m ä ä r i t y k s e t

Vesipitoisuus määritetään yleensä rakeisuus- ja tilavuuspainomääritysten yhteydessä. Se ilmoitetaan painoprosentteina kuivan aineksen määrästä.



Yleensä laboratorio-olosuhteissa vesipitoisuus määritetään kuivattamalla näyte uunissa. Menetelmä on verrattain hidas, sillä näytteen kuivattaminen saattaa viedä aikaa useita tunteja maalajista riippuen. Menetelmällä päästään helposti riittävään tarkkuuteen.

Mikäli tulokset vesipitoisuudesta tarvitaan välittömästi tai kuivausuunia ei ole käytettävissä, voidaan vesipitoisuus määrittää ilmapyknometriä tai karbidometriä käyttäen. Näistä karbidometri lienee yleisemmin käytetty. Sen toiminta perustuu kalsiumkarbidin ja maa-aineksessa olevan veden väliseen reaktioon.

Ilmapyknometriä ja karbidometriä käytetään lähinnä kenttätutkimuksissa ja niillä saavutettava tarkkuus on yleensä riittävä, mikäli koe suoritetaan oikein.

### 2.1.3 P r o c t o r - k o e

Proctor-tiiviydellä tarkoitetaan määrättyllä tiivistämismenetelmällä (Proctor-kojeella) saavutettavaa maalajin suurinta kuivatilavuuspainoa. Sitä vesipitoisuutta, jolla maksimitilavuuspaino saavutetaan, kutsutaan optimivesipitoisuudeksi.

Tiivistämistyön tarkkailussa Proctor- menetelmällä määritetään maalajin optimivesipitoisuus ja maksimikuivatilavuuspaino, johon verrataan tiivistetyn maan kuivatilavuuspainoa. Tämä ns. tiiviysaste ilmoitetaan %:na.

Pohjoismaissa on käytössä ns. parannettu Proctor-menetelmä, jossa tiivistämistyö on suurempi kuin alkuperäisessä Proctor-menetelmässä. Proctor-koe on yleensä käyttökelpoinen muissa, paitsi runsaasti kiviä tai lohkareita sisältävässä materiaalissa. Myöskään karkeissa murskaustuotteissa tehdyt kokeet eivät ole täysin luotettavia.

## 2.2 KENTTÄTUTKIMUKSET

### 2.2.1 Tilavuuspainomääritykset

Tilavuuspaino kentällä määritetään yleensä kaivamalla tarkkailukohtaan kuoppa, josta talteenotettu aines punnitaan ja kuopan tilavuus määritetään jollain menetelmällä. Lisäksi on olemassa radiometrisiä menetelmiä, jotka perustuvat radioaktiivisen säteilyn erilaisiin etenemisnopeuksiin eri tiheyksissä väliaineissa.

#### 2.2.1.1 Vesivolymetri

Vesivolymetrejä on useita eri tyyppejä, joille kaikille yhteistä on se, että em. kuopan tilavuus mitataan siihen mahtuvan vesimäärän perusteella. Vesi on volymetreissä ohuen kumikalvon sisällä, joka mukautuu kaivetun kuopan reunojen mukaan.

Suomessa yleisimmin tunnettuja ovat mäntävolymetri sekä sylinterivolymetrit mallit Soiltest, Sesamia tai tvh.

#### 2.2.1.2 Hiekkavolymetri

Hiekkavolymetrimenetelmässä kaivetun kuopan tilavuus mitataan mittahiekan avulla. Mittaus voidaan tehdä sitä varten erityisesti kehitetyn kaksoiskartion käsittävän volymetrin avulla. Kuopan tilavuus määritetään kartiota kuoppaan valutetun hiekan painon ja siitä aikaisemmin määritetyn tilavuuspainon avulla.

Koetta on käytännössä usein yksinkertaistettu siten, että asteikolla varustetusta mittalasista kaadetaan kuoppaan vakiokorkeudelta tasarakeista 0,5 - 2,0 mm kuivaa hiekkaa.

Mittalasin asteikolta voidaan lukea tällöin suoraan kuopan tilavuus. Näin menetellen koe on nopea ja yksinkertainen suorittaa ja sillä päästään riittävään tarkkuuteen.

#### 2.2.1.3 Öljymenetelmä

Öljymenetelmässä kuoppa täytetään keskijäykällä öljyllä. Öljyn menekki määritetään punnitsemalla ja tuntien öljyn tilavuuspaino voidaan kuopan tilavuus laskea.

Menetelmän onnistumisen edellytyksenä on, että kuopan seinämät ovat niin tiiviit, ettei öljy pääse valumaan pois. Tämä rajoittaa huomattavasti menetelmän käyttöä.

#### 2.2.1.4 Kipsimenetelmä

Kipsimenetelmässä kuoppa täytetään kipsimassalla. Massan kovettumisen jälkeen sen tilavuus määrätään vesipunnitusmenetelmällä.

Menetelmä on hidas eikä näin ollen sovellu jatkuvaan valvontaan.

#### 2.2.1.5 Radiometriset menetelmät

Radiometriset menetelmät perustuvat, kuten aikaisemmin on mainittu radioaktiiviseen säteilyyn. Niissä maan pintaan tai maan sisään työnnetty luotain lähettää gammasäteitä. Koska säteilyn voimakkuus pienenee sitä enemmän mitä tiheämpi maa on, voidaan vakioetäisyydelle sijoitetun säteilyn ilmaisimen ja kojekohtaisten asteikointikäyrien avulla määrätä maan tilavuuspaino.



## 2.2.2 K a n t a v u u s t u t k i m u k s e t

### 2.2.2.1 Levykuormituskoe

Kokeessa tutkittavalle pinnalle asetettua jäykkää metallilevyä kuormitetaan määräsuuruisella voimalla, jonka johdosta levy painuu. Kuormitusta voidaan lisätä asteittain ja lukemalla vastaavat painuma-arvot mittakelosta voidaan todeta kuormituksen ja muodonmuutoksen (painuman) välinen riippuvuus. Mitä pienempi muodonmuutos on, sitä kantavampi on tämä kohta. Tulokset ilmoitetaan tavallisesti kimmomoduulia vastaavina kantavuusarvoina ( $E \text{ kg/cm}^2$ ).

Toistamalla koe samassa paikassa voidaan laskea toisen ja ensimmäisen kuormituksen perusteella laskettujen kantavuusarvojen suhde  $E_2/E_1$ , joka kuvaa kuormitetun kerroksen tiiviyyttä.

### 2.2.2.2 Benkelmanpalkkikoe

Kokeessa määritetään tien pinnan taipuma, kun kuormituksenä on tavallinen kuorma-auto. Periaatteessa Benkelmanpalkkimittarilla voidaan todeta kuormituksen ja rakenteen muodonmuutoksen välinen yhteys kuten levykuormituskokeessakin.

Koe on tullut Suomessa yleisesti käyttöön vasta viime vuonna, mutta levykuormituskoetta huomattavasti nopeampana se on osoittautunut erittäin käyttökelpoiseksi varsinkin sidotuilla pinnoilla.

### 3. RAPORTOINTI

#### 3.1 RAPORTOINTITASOT

Aikaisemmin mainitussa Maanjärjestystoimikunnan ohjeluonnoksessa mainitaan seuraavat raportointitasot:

- Työmaan valvontataso
- Piirikonttoritaso
- Osastotaso (laadunvalvontatoimistotaso)

Myös tiivistämistyön laaduntarkkailu on hyvin sovitettavissa näihin tasoihin. Tosin mikäli toiminnanhaara hoitaa itse oman laadunvalvontansa, voitaisiin puhua piirikonttoritason sijasta mieluummin toiminnanhaaratasosta.

##### 3.1.1 Työmaataso

Raportointi työmaan valvontatasolla on jatkuvaa. Laborantti tai muu tutkimuksia ja mittauksia tekevä henkilö informoi jatkuvasti työkohdemestaria mittaustuloksista. Tässä käytetään laadunvalvontatositteina erilaisia tutkimuslomakkeita, kuten rakeisuus-, tiivistämistarkkailu- ja levykuormituskoelomakkeita. Työkohdemestarin on pidettävä jatkuvasti työmaapäällikkö ajan tasalla tiivistämistyön laadusta. Tämä tapahtuu parhaiten suullisin raportein em. tutkimuslomakkeita esitellen. Myös työpäällikölle raportointi voidaan hoitaa kätevimmin suullisesti ilman juhlallisia raportointimuotoja. Eri-tyisesti silloin on työpäällikölle raportoitava tulokset välittömästi, kun esiintyy vaikeuksia vaadittujen tiiviys- tai kantavuusarvojen saavuttamisessa.

### 3.1.2 Toiminnanhaarataso (Piirikonttoritaso)

Tvh:n laadunvalvontaohjeiden mukaan työmaan on lähetettävä kahden viikon välein penkereen ja päällysrakennekerrosten rakeisuutta, kantavuutta, tiiviyyttä sekä keskimääräistä korkeutta koskevat tutkimustulokset tiedoksi ao. toimialapäällikölle. Tällä esityksellä on ilmeisesti pyritty siihen, että toimialapäällikkö pystyisi raporttien perusteella vaikuttamaan esim. tiivistämistyöhön. Nykyisin toimialapäällikköjen tehtävät ovat paisuneet niin suuriksi, että tuntuu mahdottomalta, että hän kahden viikon välein tutkisi laadunvalvontaraportit ja antaisi niiden perusteella määräyksiä työmaalle. Luonnollisesti hänellä voisi olla esikunnassa henkilö, joka tutkisi raportit ja valmistelisi asian toimialapäällikölle, mutta tämäkään ei tunnu täysin mielekkäältä. Kahden viikon raportointijakso on kaiken lisäksi liian pitkä, jos halutaan tehokkaasti vaikuttaa työmaan asioihin. Tuntuu siltä, että työpäällikkö on ainoa oikea henkilö, joka varsinaisen työmaahenkilöstön lisäksi valvoo myös tiivistämistyön laatua. (Aikaisemmissa painoksissa raportit onkin esitetty lähetettäväksi työpäällikölle, joten ilmeisesti vuoden 1971 painokseen on tullut virhe). Hänellekään ei suinkaan riitä kahden viikon raportointijakso, vaan kuten aikaisemmin todettiin, hänen on saatava tieto- ja laaduntarkkailulta ainakin välittömästi silloin, kun esiintyy vaikeuksia riittävän laatutason saavuttamisessa. Hän informoi tarvittaessa toimialapäällikköä laadunvalvonnasta.

Luonnollisesti toimiala kaipaa oman säännöllisen (tiivistämistyön) laadunvalvontaraportin. Raportointijaksoksi riittänee kuitenkin rakennuskausi. Raportti voi olla esim. kuvassa 3 esitetyn graafisen raportin muotoinen.





Siihen on kuitenkin syytä liittää mukaan eräänlainen pöytäkirja, jossa työmaa voi esittää kommenttinsa tietyistä laatuvaatimusten alituksista, jyräyskalustosta, jyräyskertamääristä jne. Raportin tarkoituksena on taltioida laadunvalvonnallista tietoa helposti luettavaan muotoon. Raportin perusteella ei monestikaan ehditä kajota sen työmaan asioihin, jota raportti koskee. Kommenttinsa raportin suhteen toimialapääällikkö antaa tällöin lähinnä kouluttavassa hengessä.

### 3.1.3 O s a s t o t a s o

Nykyisten ohjeiden mukaan laaditaan sitomattomien kerrosten rakennustyön päätyttyä yhteenvetoraportti TVH:n maatutkimustoimistoon. Tämä tuntuu järkevältä, koska maatutkimustoimisto käsitelleessään tiedot keskitetysti pystyy vertailemaan laatutasoa koko maan puitteissa. Olisi sen sijaan syytä harkita, onko arvosanojen antaminen laadusta paikallaan. Luonnollisesti laatua voidaan ja sitä onkin arvosteltava, mutta arvosteluun tulisi kytkeä kustannukset jollakin tavalla mukaan. Mikäli tiivistämistyössä ruvetaan pyrkimään 100 %:n tiiviyyteen ja erittäin suuriin kantavuusarvoihin, voidaan luonnollisesti puhua tiivistämistyön ja materiaalin korkeasta laatutasosta. Jos kuitenkin pienemmillä kustannuksilla on saavutettavissa juuri vaaditut laatuarvot, on tätä pidettävä kokonaisuuden kannalta parempana tuloksena, sillä tiivistämistyön, kuten kaiken muunkin työn laadun tarkkailun päämääränä on pidettävä riittävän hyvän tuotteen aikaansaamista mahdollisimman alhaisin kustannuksin. Toivottavasti tvh:lle lähetettäviä raportteja voidaan pitää laadunvalvonnan "sisäänajosta" johtuvana välivaiheena, jonka avulla saadaan kohotettua työmaiden laatutasoa vaatimuksia vastaavaksi.

Tark. Reijo Orama

VIII LAADUNVALVONNAN TULOKSIA



## VIII LAADUNVALVONNAN TULOKSIA

## JOHDANTO

Tie- ja vesirakennushallitus määräsi 1960-luvun alussa, että eräillä suurimmilla työmailla on aloitettava järjestelmällinen materiaalien tiivistäminen. Siihen saakka oli tiivistämistyötä suoritettu tienpäälysteitä lukuunottamatta aivan sattumanvaraisesti ja ilman yhdenmuukaisia ohjeita.

Alkuvuosien kokeilun jälkeen laajeni tiivistystoiminta vasta 1960-luvun loppupuolella lähes kaikille työmaille. Tämä yleistymisen viivästyminen johtui osittain kalustopulasta ja toisaalta tiivistämistyön tarpeellisuudesta oli varsin erilaisia käsityksiä piirikonttoreissa ja tie- ja vesirakennushallituksessakin. Tiivistämistyön tarpeellisuutta on käsitelty aikaisemmissa esityksissä joten en puutu enää siihen vaan totean, että 1970-luvulla ja tänä päivänä tiivistystyö ymmärretään jo yleisesti eräänä välttämättömänä työvaiheena tienrakennustyössä.

## 1. TIIVISTYSTYÖN TULOSVALVONTA

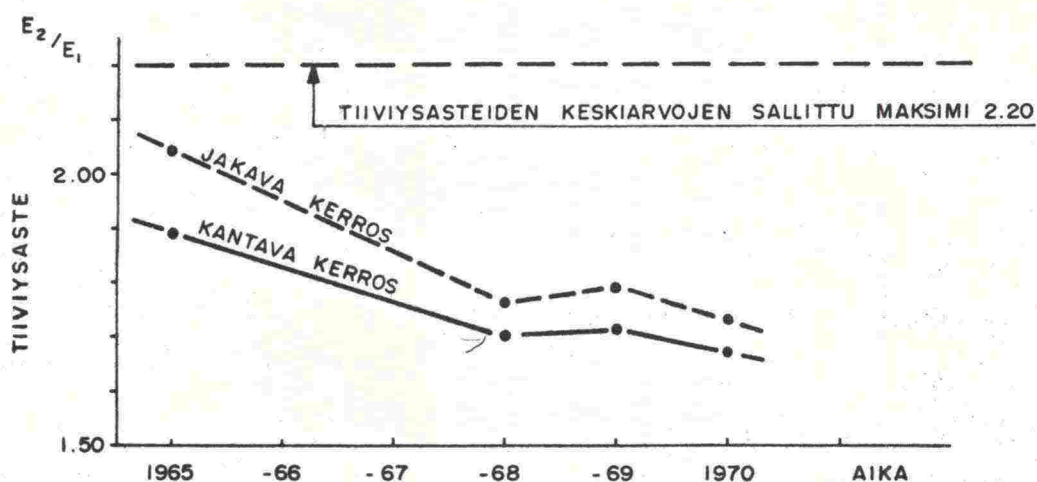
Tiivistystoiminnan alkaessa katsottiin aiheelliseksi, että tulosvalvontaa hoidetaan keskitetysti tie- ja vesirakennushallituksesta käsin siihen saakka kunnes voidaan varmistua, että tiivistystyön merkitys ymmärretään piirikonttoreissa ja työmailla ja että tänä aikana voidaan samalla myös kehittää tulosten avulla ohjeita ja valvontaa.

## 2. KANTAVUUSTULOKSET

### 2.1 TIIVIYSASTE

Tarkkailuaikana saatujen kantavuustulosten avulla voidaan arvostella tiivistystyön tulosten kehitystä.

Kuvassa 1 on esitetty levykuormituskokeen avulla saatujen kantavuusarvojen suhteen  $E_2/E_1$  eli ns. tiiviysasteen muutokset tarkkailukautena 1965 - 1970.



Kuva 1. Koko maan keskimääräisten tiiviysasteiden muutokset tarkkailukautena 1965 - 1970.

Käyrät osoittavat selvästi, että tehokas tiivistystyö on jatkuvasti lisääntynyt. Lisäys on ollut jakavan kerroksen osalla hieman kantavaa suurempi. Tiiviysasteen muutokset kehitys on ollut jatkuvasti laskeva, vaikka vuodesta 1969 lähtien on yksittäisarvojen tiiviysastevaativuudesta merkittävästi lievennetty. Saavutetut keskiarvotulokset alittavat erittäin selvästi asetetun keskiarvojen maksimi-arvorajan 2,20.

Piirikohtaista tiivistystyötä voidaan tarkastella taulukossa 1 esitettyjen arvojen perusteella.

Piiri	Kantava kerros				Jakava kerros			
	1965	1968	1969	1970	1965	1968	1969	1970
Uusimaa	1,67	1,88	1,86		1,78	1,83	1,84	
Turku	1,73	1,75	1,74		1,81	1,78	1,84	
Häme	1,83	1,90	1,81		1,78	1,88	1,80	
Kymi	1,70	1,69	1,71		1,75	1,71	1,70	
Mikkeli	1,86	1,80	1,88		1,89	1,88	1,96	
Pohjois-Karjala	1,83	1,71	1,59		1,81	1,78	1,65	
Kuopio	1,70	1,83	1,75		1,73	1,87	1,71	
Keski-Suomi	1,66	1,62	1,41		1,73	1,71	1,58	
Vaasa	1,73	1,74	1,67		1,93	1,88	1,58	
Keski-Pohjanmaa	1,83	1,33	1,57		1,88	1,40	1,60	
Oulu	1,66	1,73	1,84		1,58	1,79	1,84	
Kainuu	1,49	1,45	1,42		1,62	1,61	-	
Lappi	1,51	1,76	1,63		1,62	1,87	1,61	
Koko maa	1,89	1,70	1,71	1,67	2,04	1,76	1,79	1,73

Taulukko 1. Tiiviysasteen  $E_2/E_1$  yhteenveto tarkkailukaudella 1965 - 1970

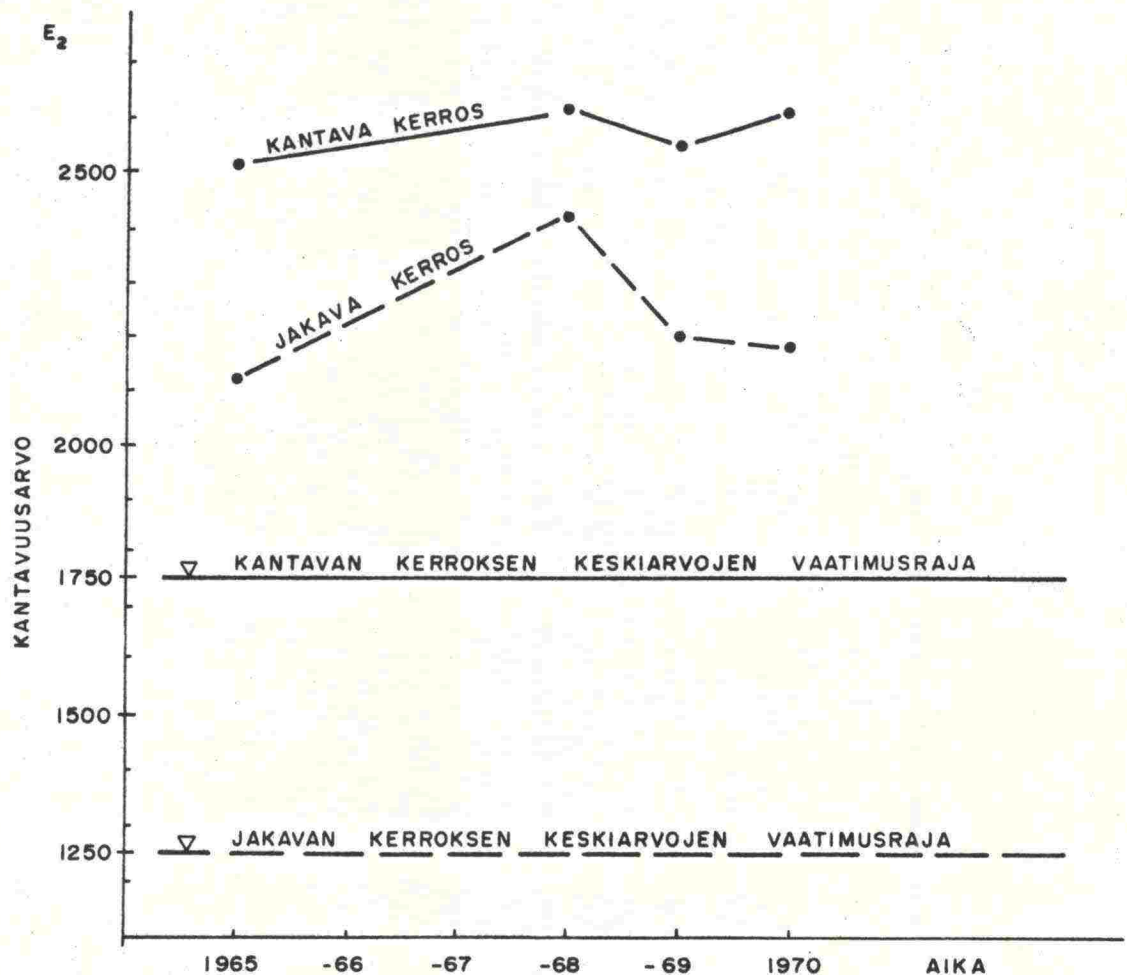
Tällöin voidaan todeta, että esimerkiksi v. 1970 on jakavaa kerrosta tiivistetty keskimääräistä enemmän Keski-Suomen, Vaasan, Keski-Pohjanmaan, Lapin, Pohjois-Karjalan, Kymen ja Kuopion piireissä ja muissa sitä vähemmän. Vähiten on tiivistystyötä jakavan kerroksen osalta tehty Mikkelin ja Oulun piireissä. Arvosteltaessa tiivistystyötä pelkästään keskiarvotulosten perusteella voidaan todeta tiivistystyön onnistuneen yleensä hyvin. Työmaakohtaisia poikkeuksia luonnollisesti on ja huonoja tuloksia on suhteellisesti enemmän niissä piireissä, joissa saavutettu keskiarvotulos on lähellä sallittua ylärajaa.



## 2.2 KANTAVUUSARVOT

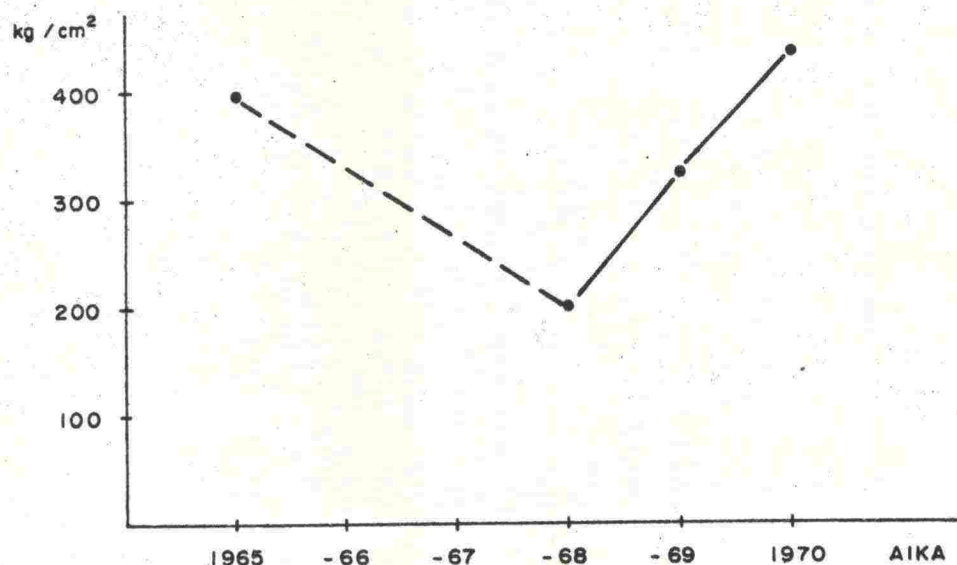
Tässä yhteydessä voidaan tarkastella hieman myös varsinainen kantavuusarvojen ( $E_2$ ) muutoksia tarkkailuaikana sekä tehdä niiden perusteella eräitä johtopäätöksiä.

Kuvassa 2 on esitetty jakavan ja kantavan kerroksen kantavuusarvojen muutokset tarkkailuaikana 1965 - 1970.



Kuva 2. Koko maan  $E_2$ -arvojen keskiarvot

Kantavan kerroksen keskimääräiset kantavuusarvot ovat pysyneet varsin vakaina, mutta jakavan kerroksen arvot ovat kahtena viimeisenä tarkkailuvuotena selvästi pienentyneet. Kuvasta 3 voidaan todeta, että eri kerrosten keskimääräinen erotus on varsin suoraviivaisesti kasvanut.



Kuva 3. Koko maan kantavan ja jakavan kerroksen  $E_2$ -keskiarvojen erotus

Jos verrataan saavutettuja tuloksia vaatimuservoihin voidaan todeta, että koko maan jakavan kerroksen arvot ylittävät vaatimusrajan ( $1250 \text{ kg/cm}^2$ ) keskimäärin n. 1,69 - 1,94 kertaisesti. Kantavan kerroksen arvot ylittävät

n. 1,43 - 1,50 kertaisesti raja-arvon  $1750 \text{ kg/cm}^2$ .  
Piirikohtaisia tuloksia voidaan tarkastella taulukon 2 avulla.

Piiri	Kantava kerros				Jakava kerros			
	1965	1968	1969	1970	1965	1968	1969	1970
Uusimaa	2434	2596	2692		2482	2490	2334	
Turku	2675	2390	2280		2231	1848	1557	
Häme	2791	2372	2663		2753	2320	2266	
Kymi	2670	2869	3449		2168	2979	3158	
Mikkeli	2602	2654	2858		2359	2112	2174	
Pohjois-Karjala	3247	3023	3135		2775	2961	2574	
Kuopio	2770	2627	2832		2883	1955	2248	
Keski-Suomi	2459	2284	2449		2391	2110	2270	
Vaasa	2606	3001	2616		1862	2783	1875	
Keski-Pohjanmaa	2645	2590	2923		1973	1913	2377	
Oulu	2418	2265	2186		2673	2360	2207	
Kainuu	2554	2446	1989		1501	1600	-	
Lappi	2679	2495	2553		2375	1961	2407	
Koko maa	2510	2617	2546	2609	2111	2414	2197	2175

Taulukko 2. Kantavuusarvojen  $E_2$  yhteenveto tarkkailukaudella 1965 - 1970

Esimerkiksi vuoden 1970 tulosten perusteella voidaan todeta, että jakavan kerroksen kaikki tulokset ylittävät vaatimusrajan, ylityskertoimen vaihdella välillä n. 1,25 - 2,53. Kantavan kerroksen tulokset täyttävät myös hyvin vaatimuksen, ylityskertoimen vaihdella välillä 1,13 - 1,98.



Tuloksista voidaan päätellä, että vaatimusrajan täytön varmistamiseksi tuhlataan materiaalin laadussa (vrt. maksimi-arvot) ilmeisesti yleensä varsin paljon. Toisaalta voidaan todeta (minimi-arvot), että asetetut vaatimukset sinänsä ovat helposti saavutettavissa ohjeiden mukaisilla minimipaksumuksilla sekä materiaalivaatimusten hienoimmalla (huonoimmalla) aineksella kunhan tiivistämistyö on hyvin suoritettu. Materiaalin tuhlauksesta ei voi kuitenkaan puhua luotettavasti pelkästään näiden selvitysten pohjalta, sillä eräissä tapauksissa hyvän materiaalin ajo työkohteeseen voi olla halvempaa kuin näennäisesti halvemman, juuri ja juuri vaatimusrajan täyttävän materiaalin. Huonon materiaalin käyttö tuo myös vaikeuksia, sillä sen tiivistäminen usein vaikeutuu ja tällainen materiaali aiheuttaa usein myös lisäkustannuksia työnaikaisessa kunnossapidossa.

### 3. PROCTOR-TULOKSET

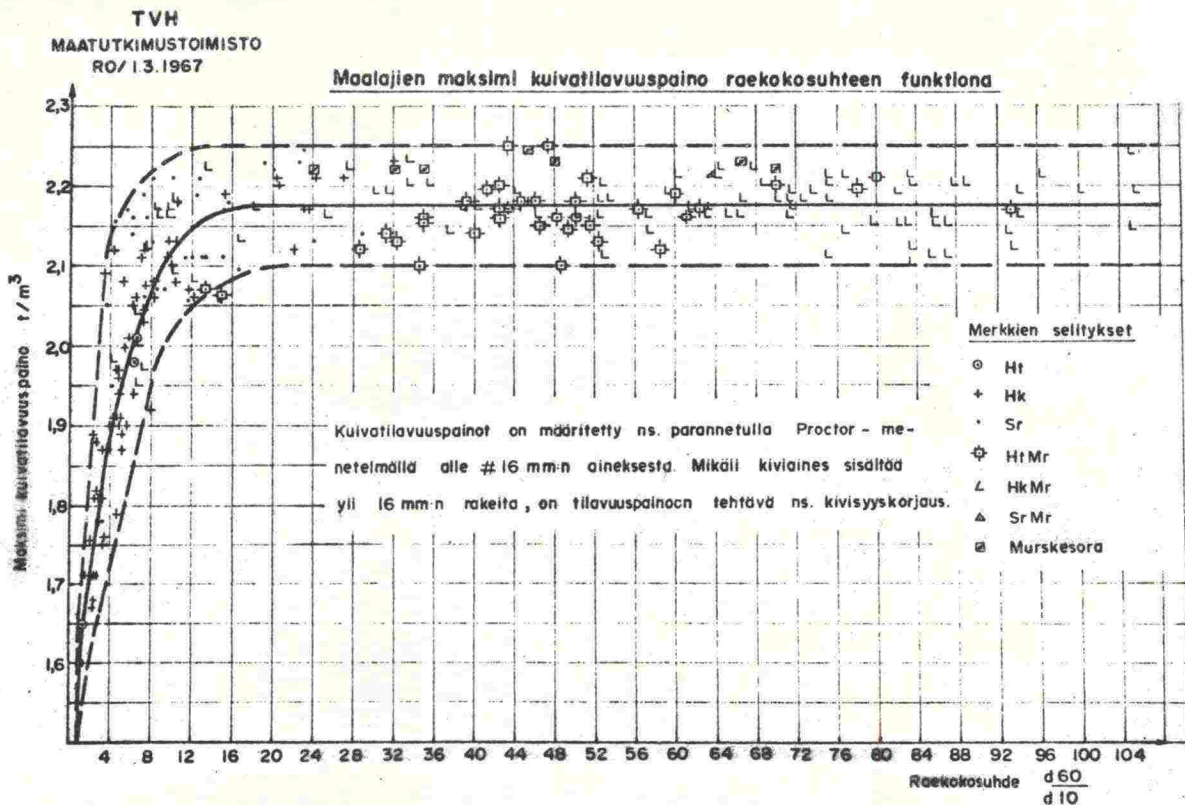
Proctor-tarkkailua on pyritty suorittamaan etupäässä penger-, eristys- ja suodatin- sekä jakavan kerroksen materiaaleista. Menetelmän vaikeudet ovat kuitenkin ilmeiset, sillä näitä kokeita ei ole tehty kaikissa piireissä johdonmukaisesti. Tähän on todennäköisesti vaikuttanut työselityksen ohje, jonka mukaan Proctor-kokeet voidaan korvata levykuormituskokeilla. Toisaalta alusrakenteen, penkereen, eristys- ja jakavan kerroksen työt tehdään pääasiassa talvella, jolloin Proctor-tarkkailu on usein hieman hankalaa. Taulukon 3 avulla voidaan tarkastella v. 1969 tuloksia, josta ilmenee, että mm. keskimääräiset arvot ovat suhteellisen lähellä vaatimusrajaa, mutta varsin huomattavia piirikohtaisia poikkeamia esiintyy ja eräissä piireissä Proctor-kokeita ei ole tehty kaikista kerroksista eikä Kuopion ja Vaasan piireissä lainkaan.

Piiri	Keskimääräinen tiiviysaste %				
	Kantava	Jakava	Eristys	Penger	Alusrak
Uusimaa	-	-	96,0	100,3	-
Turku	104,2	97,7	95,4	-	-
Häme	97,2	-	94,8	96,9	-
Kymi	108,3	105,2	-	-	-
Mikkeli	-	99,9	96,1	96,9	97,5
Pohjois-Karjala	-	97,6	95,3	95,6	-
Kuopio	-	-	-	-	-
Keski-Suomi	-	99,2	97,8	95,3	95,1
Vaasa	-	-	-	-	-
Keski-Pohjanmaa	-	-	89,1	-	-
Oulu	-	-	93,4	92,2	88,6
Kainuu	-	95,1	90,2	88,7	-
Lappi	99,5	-	96,1	92,3	-
Koko maa	102,8	99,5	93,9	94,5	95,3
Vaadittu	97,0	97,0	95,0	90-95	90-95

Taulukko 3. Tiivistysasteiden (Proctor) yhteenveto  
vuodelta 1969

Proctor-koe on laboratoriotyön osalta varsin hankala ja raskaskin toteuttaa, jonka vuoksi piirien laboratorio- ja tarkkailuhenkilökunta on sitä paljon arvostellut. Henkilökohtainen käsitykseni on, että menetelmä on nykyisin koneiden aikakaudella jo hieman "vanhentunut", Mielestäni voitaisiin laboratoriotyötä helpottaa siirtymällä "tilastolliseen" maksimitilavuuspainon- ja optimivesipitoisuuden määrittämiseen. Tähän suuntaan on otettu-kin jo ratkaiseva askel, kun laaduntarkkailuhjeeseen (tvh 2.816) otettiin kuvan 4 mukainen maalajien rakeisuusuteen perustuva maksimitilavuuspainon määritysohje.





Kuva 4. Maalajien maksimi kuivatilavuuspaino raekokosuhteen funktiona

Ohjekäyrä on laadittu piirikonttoreiden tutkimustulosten pohjalta. Saman aineiston perusteella on jo aikaisemmin tarkistettu maalajien optimivesipitoisuusarvoja, jotka on esitetty em. laaduntarkkailuohjeissa.

Mikäli Proctor-kokeista halutaan kokonaan luopua olisi vastaavasti kehitettävä alempien rakennekerrosten levykuormitusvaatimuksia, jotta tarkkailu voitaisiin toteuttaa tällä jo täysin hyväksytyllä ja suhteellisen luotettavalla menetelmällä.

#### 4. TIIVISTYSTYÖN LAADUN ARVOSTELU

Eräät piirikonttorit ovat arvostelleet tvh:n tapaa antaa työn yleisarvosana huonosta erittäin hyvään ja on



esitetty, että myös kustannukset olisi oltava mukana, jos tällaista arvostelua suoritetaan. Arvostelu perustuu puhtaasti työn teknillisen suorituksen ja laadun arvosteluun sekä vertailuun miten eri osatekijät: tiiviys (tiivistäminen), kantavuus, rakeisuus ja korkeusasema (kerrosten paksuudet) suhtautuvat annettuihin ohjearvoihin. On totta, että kustannukset pitäisi ottaa myös huomioon, mutta ne pitäisi ottaa huomioon jo työtä suunniteltaessa ja suoritettaessa eikä suinkaan puolustuksena sen jälkeen, kun tvh on arvostellut ja huomauttanut työn huonoudesta.

Laaduntarkkailu ei saa olla mikään itsetarkoitus vaan sen avulla on pyrittävä ohjaamaan työn aikana työn suoritusta siten, että saavutetaan taloudellisesti eli mahdollisimman alhaisin kustannuksin teknilliset laatuvaatimukset täyttävä lopputulos.